

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Ante Barišić

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc.dr.sc. Ivica Garašić

Student:

Ante Barišić

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se doc.dr.sc. Ivici Garašiću na privilegiji izrade diplomskog rada pod njegovim mentorstvom. Pruženi potpora, razumijevanje, vodstvo, strpljivost i susretljivost su mi pravo nadahnuće za daljni profesionalni i osobni razvoj.

Zahvaljujem tvrtki Đuro Đaković Specijalna vozila d.d. na omogućavanju izrade zanimljivog i istraživački opširnog diplomskog rada. Posebno zahvaljujem gospodinu Borislavu Peciću i gospodinu Goranu Mataniću na susretljivosti, suradnji i korisnim savjetima.

Zahvaljujem tvrtkama DURUM GmbH i Vorax d.o.o. na suradnji i savjetima.

Zahvaljujem tvrtki DOK-ING d.o.o. na pruženoj tehničkoj podršci i savjetima. Posebno se zahvaljujem gospođi Zdenki Bartošak.

Zahvaljujem se svim djelatnicima Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu koji su svojim znanjem i dobrom voljom pomogli u izradi rada. Posebno se zahvaljujem prof.dr.sc. Slobodanu Kralju koji je omogućio pokretanje izrade rada.

Na kraju se zahvaljujem svojoj majci, ocu i prijateljima na bezuvjetnoj podršci tijekom izrade ovog rada i cijelog studija.

Ante Barišić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **ANTE BARIŠIĆ**

Mat. br.: **0035174044**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **ODREĐIVANJE BALISTIČKIH ZNAČAJKI ZAVARENOG SPOJA ČELIKA ARMOX 500T**

Naslov rada na engleskom jeziku: **DETERMINATION OF BALISTIC CHARACTERISTICS ON ARMOX 500T STEEL WELDED JOINT**

Opis zadatka:

Proučiti značajke oklopnih čelika visoke tvrdoće i odrediti stupanj zavarljivosti obzirom na primjenu različitih postupaka zavarivanja. Opisati moguće tehnologije zavarivanja uz obrazloženje odabira dodatnih materijala. Specificirati balističke značajke oklopnih čelika visoke tvrdoće i usporediti sa balističkim ponašanjem u zoni zavarenog spoja tj. metalu zavara i zoni utjecaja topline. Dati primjere čelika Armox 500T u proizvodnji zavarivanjem.

U eksperimentalnom dijelu potrebno je na čeliku Armox 500T zavariti uzorke uz primjenu pune i praškom punjene žice. Odabrati odgovarajuće dodatne materijale i propisati tehnologiju zavarivanja za pojedina stanja eksperimenta. Zavarene uzorke podvrgći balističkom testiranju odgovarajućim streljivom i to na način da je moguće provesti komparativnu analizu svih zona zavarenog spoja. Dodatno provesti prikladna mehanička i mikrostrukturna ispitivanja. Na temelju dobivenih rezultata ocijeniti prikladnost pojedine tehnologije zavarivanja za primjenu izrade oklopa uzimajući u obzir balistička i mehanička svojstva.

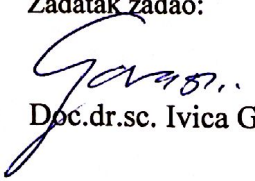
Zadatak zadan:
7. svibnja 2015.

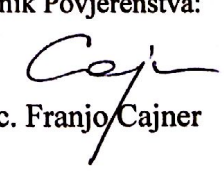
Rok predaje rada:
9. srpnja 2015.

Predviđeni datum obrane:
15., 16. i 17. srpnja 2015.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:


Doc. dr. sc. Ivica Garašić


Prof. dr. sc. Franjo Cajner

Sadržaj

Sadržaj	i
Popis slika	iv
Popis tablica	vi
Prilog tehničke dokumentacije	vii
Sažetak	viii
Summary	ix
1. UVOD	1
2. OKLOPNI ČELICI VELIKE TVRDOĆE	2
2.1. Proizvodnja OČVT	2
2.2. Svojstva OČVT	6
2.2.1. Kemijski sastav	7
2.2.1.1. Utjecaj legirnih elemenata	8
2.2.2. Mikrostruktura	10
2.2.2.1. Mehanizmi očvrnuća ultra čvrstih čelika	10
2.2.3. Svojstva	11
2.2.3.1. Fizikalna svojstva	12
2.2.3.2. Mehanička svojstva	12
2.2.3.3. Rezljivost	12
2.2.3.4. Obrada odvajanjem čestica	12
2.2.3.5. Deformiranje	13
3. ZAVARENI SPOJ OKLOPNIH ČELIKA VELIKE TVRDOĆE	13
3.1. Mikrostruktura	14
3.2. Unos topline	14
3.2.1. Električni luk	15
3.2.1.1. Karakteristike električnog luka	15
3.2.2. Predgrijavanje	15
3.2.2.1. Proračun temperature predgrijavanja	16
3.3. Greške zavarenog spoja	17
3.3.1. Hladne pukotine	17
3.4. Razvoj tehnologije zavarivanja	19
3.5. MIG/MAG i FCAW	21
3.5.1. O postupcima	22
3.5.2. Parametri	23
3.5.2.1. Promjer dodatnog materijala	23
3.5.2.2. Napon struje zavarivanja	23
3.5.2.3. Jakost struje zavarivanja	24

3.5.2.4.	Induktivitet	24
3.5.2.5.	Slobodni kraj žice	24
3.5.2.6.	Zaštitni plinovi i prašci	25
3.5.2.7.	Položaj zavarivačkog pištolja	25
3.5.2.8.	Njihanje pištolja	26
3.5.3.	Prednosti i nedostaci	26
3.5.4.	Kontrola postupka	26
3.5.4.1.	Struja zavarivanja	27
3.5.4.2.	Kontrolirano pomicanje žice	28
3.5.5.	Prijenos metala	28
3.5.5.1.	Prijenos kratkim spojevima	28
3.5.5.2.	Prijenos prijelaznim lukom	30
3.5.5.3.	Prijenos štrcajućim lukom	30
3.5.5.4.	Prijenos impulsnim zavarivanjem	30
4.	OTPORNOST NA PROBOJNOST ZAVARA OKLOPNIH ČELIKA VELIKE TVRDOĆE	32
4.1.	Mehanika proboja	32
4.1.1.	Penetratori kemijskom energijom	32
4.1.2.	Penetratori kinetičkom energijom	34
4.1.3.	Mehanizmi proboja oklopa	35
4.1.4.	Proboj kinetičkim penetratorom	36
4.1.4.1.	Proračun proboja	38
4.1.4.2.	Rikoše	39
4.1.4.3.	Podjela procesa proboja	41
5.	ZAKLJUČNI OSVRT NA TEORETSKI DIO	43
6.	UVOD EKSPERIMENTALNOG DIJELA	44
6.1.	Osnovni materijal	45
6.1.1.	Priprema osnovnog materijala	45
6.2.	Dodatni materijal	45
6.2.1.	Lincoln Electric® MIG 309L Si	45
6.2.2.	Durmat® FD 739	46
6.2.3.	Castolin Eutectic® EnDOtec® DO*30	47
6.3.	Tijek zavarivanja	48
6.3.1.	Međusloj	48
6.3.2.	Korijenski prolaz	51
6.3.3.	Uzorci U1-1 i U1-2	52
6.3.4.	Uzorci U2-1 i U2-2	53
6.3.5.	Uzorci U3-1 i U3-2	54
6.3.6.	Uzorci U4-1 i U4-2	55
7.	BALISTIČKA ISPITIVANJA	56
7.1.	Uzorak U1-1	57
7.2.	Uzorak U2-1	60
7.3.	Uzorak U3-1	62

7.4. Uzorak U4-1	64
8. MAKRO ANALIZA.....	68
8.1. Uzorak T1-1	69
8.2. Uzorak T2-2.....	70
8.3. Uzorak T3-1	71
8.4. Uzorak T4-1	72
8.5. Uzorak H1-1	73
8.6. Uzorak H1-2	74
8.7. Uzorak H1-3	75
8.8. Uzorak H1-5	76
8.9. H2-2	76
8.10. Uzorak H2-5	77
8.11. Uzorak H3-2	78
8.12. Uzorak H3-4	79
8.13. Uzorak H4-1	80
8.14. Uzorak H4-2	81
9. ISPITIVANJE TVRDOĆE.....	82
9.1. Uzorak T1-1	83
9.2. Uzorak T2-2.....	84
9.3. Uzorak T3-1	85
9.4. Uzorak T4-1	86
10. ISPITIVANJE VLAČNE ČVRSTOĆE.....	87
10.1. Uzorci K1-1 i K1-2	88
10.2. Uzorci K2-1 i K2-2	90
10.3. Uzorci K3-1 i K3-2	92
10.4. Uzorci K4-1 i K4-2	95
11. PREPORUKA ZA DALJNI RAZVOJ	97
12. ZAKLJUČAK.....	99
LITERATURA.....	101
PRILOZI.....	103

Popis slika

Slika 1.	Proizvodni proces oklopnih čelika velike tvrdoće [3].....	2
Slika 2.	Visoka peć [4]	3
Slika 3.	Kisikov konverter [4]	4
Slika 4.	Ljevački lonac [4].....	5
Slika 5.	Kontinuirano lijevanje [4]	5
Slika 6.	Toplo valjanje [4]	6
Slika 7.	Rezanje, popuštanje, gašenje, pjeskarenje i površinska zaštita premazom [4]	6
Slika 8.	Mikrostruktura ARMOX® 500T čelika [5]	11
Slika 9.	Brzina hlađenja s predgrijavanjem i bez njega.....	16
Slika 10.	Uzročnici nastajanja pukotina [18].....	18
Slika 11.	Rastvorljivost vodika u čistom Fe [18]	19
Slika 12.	Shematski prikaz opreme i procesa GMAW postupka zavarivanja [11]	22
Slika 13.	Tehnike rada [13]	26
Slika 14.	CV karakteristika izvora struje [12]	27
Slika 15.	CMT postupak [14]	28
Slika 16.	Prijenos metala kratkim spojevima [15].....	29
Slika 17.	Prijenos metala štrcajućim lukom [13].....	30
Slika 18.	Prijenos metala impulsima [13].....	31
Slika 19.	Redoslijed događaja pri probodu oblikovanim eksplozivom.....	33
Slika 20.	Krivulja proboda mlaza kroz valjani homogeni oklop (eng. RHA, Rolled Homogenous Armor) [19]	34
Slika 21.	Tipovi kinetičkih penetratora [19].....	34
Slika 22.	Mehanizmi proboda oklopa [20]	36
Slika 23.	Proboj kinetičkom energijom [20]	37
Slika 24.	Utjecaj udarnih valova pri kinetičkom probodu [20]	38
Slika 25.	Statistička metoda određivanja balističkog limita [19]	39
Slika 26.	Metoda rezidualne brzine [19]	39
Slika 27.	Faze udara velikih brzina [20].....	42
Slika 28.	Položaj zavarivanja međusloja	49
Slika 29.	Konfiguracija zavarivanja međusloja.....	50
Slika 30.	Konfiguracija zavarivanja međusloja, bočna strana.....	50
Slika 31.	Izbrušenje korijena	51
Slika 32.	Redoslijed zavarivanja uzoraka U1-1, U1-2, U3-1, U3-2, U4-1 i U4-2	52
Slika 33.	Redoslijed zavarivanja uzoraka U2-1 i U2-2	53
Slika 34.	Čahura iskorištenog standardnog metka 7,62x51 s bakrenom košuljicom	56
Slika 35.	Uvjeti gađanja.....	56
Slika 36.	Probna meta učvršćena u noseći okvir	57
Slika 37.	U1-1, prednja strana	58
Slika 38.	U1-1, stražnja strana.....	58
Slika 39.	U2-1, prednja strana	60
Slika 40.	U2-1, stražnja strana.....	60
Slika 41.	U3-1, prednja strana	62
Slika 42.	U3-1, stražnja strana.....	62
Slika 43.	U4-1, prednja strana	64
Slika 44.	U4-1, stražnja strana.....	64

Slika 45.	Krhotina 1 uzorka U4-1, prednja strana	66
Slika 46.	Krhotina 1 uzorka U4-1, stražnja strana.....	66
Slika 47.	Krhotina 2 uzorka U4-1, prednja strana	67
Slika 48.	Krhotina 1 uzorka U4-1, prednja strana	67
Slika 49.	Uzorak balistički oštećenje točke	68
Slika 50.	Uzorak T1-1	69
Slika 51.	Uzorak T2-2	70
Slika 52.	Uzorak T3-1	71
Slika 53.	Uzorak T4-1	72
Slika 54.	Uzorak H1-1	73
Slika 55.	Uzorak H1-2	74
Slika 56.	Uzorak H1-3	75
Slika 57.	Uzorak H1-5	76
Slika 58.	Uzorak H2-2	76
Slika 59.	Uzorak H2-5	77
Slika 60.	Uzorak H3-2	78
Slika 61.	Uzorak H3-4	79
Slika 62.	Uzorak H4-1	80
Slika 63.	Uzorak H4-2	81
Slika 64.	Mjesta otisaka na uzorku T1-1	83
Slika 65.	Mjesta otisaka na uzorku T2-2	84
Slika 66.	Mjesta otisaka na uzorku T3-1	85
Slika 67.	Mjesta otisaka na uzorku T4-1	86
Slika 68.	Uzorak K1-1, bočni pogled	88
Slika 69.	Uzorak K1-1, frontalni pogled	88
Slika 70.	Uzorak K1-2, bočni pogled	89
Slika 71.	Uzorak K1-2, frontalni pogled	89
Slika 72.	Uzorak K2-1, bočni pogled	90
Slika 73.	Uzorak K2-1, frontalni pogled	91
Slika 74.	Uzorak K2-2, bočni pogled	91
Slika 75.	Uzorak K2-2, frontalni pogled	92
Slika 76.	Uzorak K3-1, bočni pogled	93
Slika 77.	Uzorak K3-1, frontalni pogled	93
Slika 78.	Uzorak K3-2, bočni pogled	94
Slika 79.	Uzorak K3-2, frontalni pogled	94
Slika 80.	Uzorak K4-1, bočni pogled	95
Slika 81.	Uzorak K4-1, frontalni pogled	96
Slika 82.	Uzorak K4-2, bočni pogled	96
Slika 83.	Uzorak K4-2, frontalni pogled	96
Slika 84.	Oblikovanje budućeg spoja	98
Slika 85.	Redoslijed zavarivanja budućeg spoja	98

Popis tablica

Tablica 1. Granica između primjese i legirajućeg elementa za pojedine kemijske elemente [6]	7
Tablica 2. Kemijski sastav čelika ARMOX® 500T i ATI 500-MIL™ [2] i [4].....	8
Tablica 3. Mehanička svojstva čelika ARMOX® 500T i ATI 500-MIL™ [2] i [4]	12
Tablica 4. Plan pokusa.....	44
Tablica 5. Mehanička svojstva dodatnog materijala Lincoln Electric® MIG 309L Si.....	45
Tablica 6. Kemijski sastav dodatnog materijala Lincoln Electric® MIG 309L Si	46
Tablica 7. Mehanička svojstva Durmat® FD 739.....	46
Tablica 8. Kemijski sastav dodatnog materijala Durmat® FD 739	47
Tablica 9. Mehanička svojstva Castolin Eutectic® EnDOtec® DO*30.....	47
Tablica 10. Raspored spojenih ploča.....	48
Tablica 11. Parametri navarivanja prolaza međusloja.....	49
Tablica 12. Parametri zavarivanja korijenskog prolaza	51
Tablica 13. Parametri zavarivanja prolaza popune	52
Tablica 14. Parametri zavarivanja pokrovnih prolaza.....	53
Tablica 15. Parametri zavarivanja završnog sloja uzoraka U2-1 i U2-2 i pokrovnog sloja U4-1 i U4-2.....	54
Tablica 16. Parametri zavarivanja sloja popune uzoraka U3-1 i U3-2	54
Tablica 17. Pogodci U1-1	59
Tablica 18. Pogodci U2-1.....	61
Tablica 19. Pogodci U3-1	63
Tablica 20. Pogodci U4-1.....	65
Tablica 21. Rezultati mjerenja tvrdoće ZUT-a.....	82
Tablica 22. Rezultati mjerenja tvrdoće uzorka T1-1, HV10	83
Tablica 23. Rezultati mjerenja tvrdoće uzorka T2-2, HV10	84
Tablica 24. Rezultati mjerenja tvrdoće uzorka T3-1, HV10	85
Tablica 25. Rezultati mjerenja tvrdoće uzorka T4-1, HV10	86
Tablica 26. Rezultati vlačnog ispitivanja	87

Prilog tehničke dokumentacije

1. Ploča sa skošenjem, priprema za zavareni spoj
2. Specifikacija postupka zavarivanja – U1
3. U1-2, plan rezanja
4. Specifikacija postupka zavarivanja – U2
5. U2-2, plan rezanja
6. Specifikacija postupka zavarivanja – U3
7. U3-2, plan rezanja
8. Specifikacija postupka zavarivanja – U4
9. U4-2, plan rezanja

Sažetak

Ovaj rad u svom teoretskom dijelu opisuje oklopne čelike velike tvrdoće i pojave koje se događaju tokom njihovog zavarivanja. Isto tako sadrži dio za bazično razumijevanje terminalne balistike oklopa. U praktičnom dijelu postiže se eksperimentalnim putem povećana balistička otpornost zavarenih spojeva oklopnih čelika velike tvrdoće kombinacijom više različitih dodatnih materijala različitih tvrdoća. Eksperiment obuhvaća ostvarivanje zavarenog spoja, njegovo balističko ispitivanje kao i ispitivanja tvrdoće i vlačne čvrstoće te makro-analizu.

Primarni cilj je postojećim tehnologijama zavarivanja kontrolirati tvrdoću zavarenog spoja čime se osigurava balistička otpornost dok je sekundarni cilj zadovoljiti potrebe čvrstoće spoja.

Ključne riječi:

Čelik ARMOX 500T, zavarivanje, balistička svojstva

Summary

This thesis in its theoretical part describes high hardness armor steels and effects that happen during their welding. Also it contains part about most common used welding processes as well as part about basic understanding of terminal ballistics of armor. In practical part through experimentation enhanced ballistical endurance of welded joints of high hardness armor steels combining several different welding wires of different hardness is investigated. An experiment consists of joint welding, their ballistical testing as well as hardness and yield strenght testing. Primary goal is to control the hardness of welded joint by existing welding technologies to ensure ballistical endurance whilst secondary goal is to satisfy requirements for joint strenght.

Key words:

ARMOX 500T steel, welding, ballistic propreties

.

1. UVOD

Povijest oklopnih materijala seže daleko u prošlost čovječanstva gdje su metali zauzeli jedno od najvažnijih mjesta među materijalima korištenima u oklopne svrhe. Zabilježeno je da, tijekom stoljeća ratovanja, vojske koje koriste oklope pobjeđuju one neoklopljene. Kako su metali postajali sve uobičajeniji, a ljudi sve vještiji u njihovoj obradi, omogućeno je malenim vojskama potpuno opremanje oklopima toliko djelotvornima da ih je moglo probiti samo nekolicina projektila određenog doba. Doduše, u ranijoj povijesti je bilo skoro pa i nemoguće opremiti velike vojske kompletnom oklopnom opremom i stotinama godina se vodilo ratove na nogama i konjima. Tek je početak industrijske revolucije osigurao uvjete za razvoj masovne proizvodnje oklopa. Zaslužno za ovo su prvenstveno nove tehnologije u proizvodnji, ali i potreba za svladavanjem stalno rastućih prijetnji, ironično, mnoge od njih su isto tako proizišle iz industrijske revolucije.

Klasični način ratovanja vodio se tisućama godina, gdje su ratovi vođeni uporabom gotovo isključivo ljudskih i životinjskih mišića kao izvorom snage za pokretanje, no u posljednjih 80 godina došlo je do drastičnih promjena. Vojske su postale mobilnije i fleksibilnije uporabom tehnike proizišle iz industrijske revolucije, kao što je motor s unutarnjim izgaranjem. Ovako mobilne jedinice vrlo su brzo ovladavale kopnenim, zračnim i morskim prostorom. Ipak, unatoč preokretu, pobjeda je uvijek ovisila o tri osnovna faktora: mobilnost, vatrena moć i zaštita. Mobilnost i zaštita su oduvijek postavljali određene zahtjeve za oklop. Mobilnost zahtijeva najlakši mogući oklop, dok se zaštita generalno povećava s povećanjem mase oklopa, smanjujući mobilnost. Ova problematika je postavljala glavni izazov istraživačima i znanstvenicima na ovom području što je poticalo inovativnost i dosjetljivost u samom konstruiranju i razvijanju materijala za zaštitu.

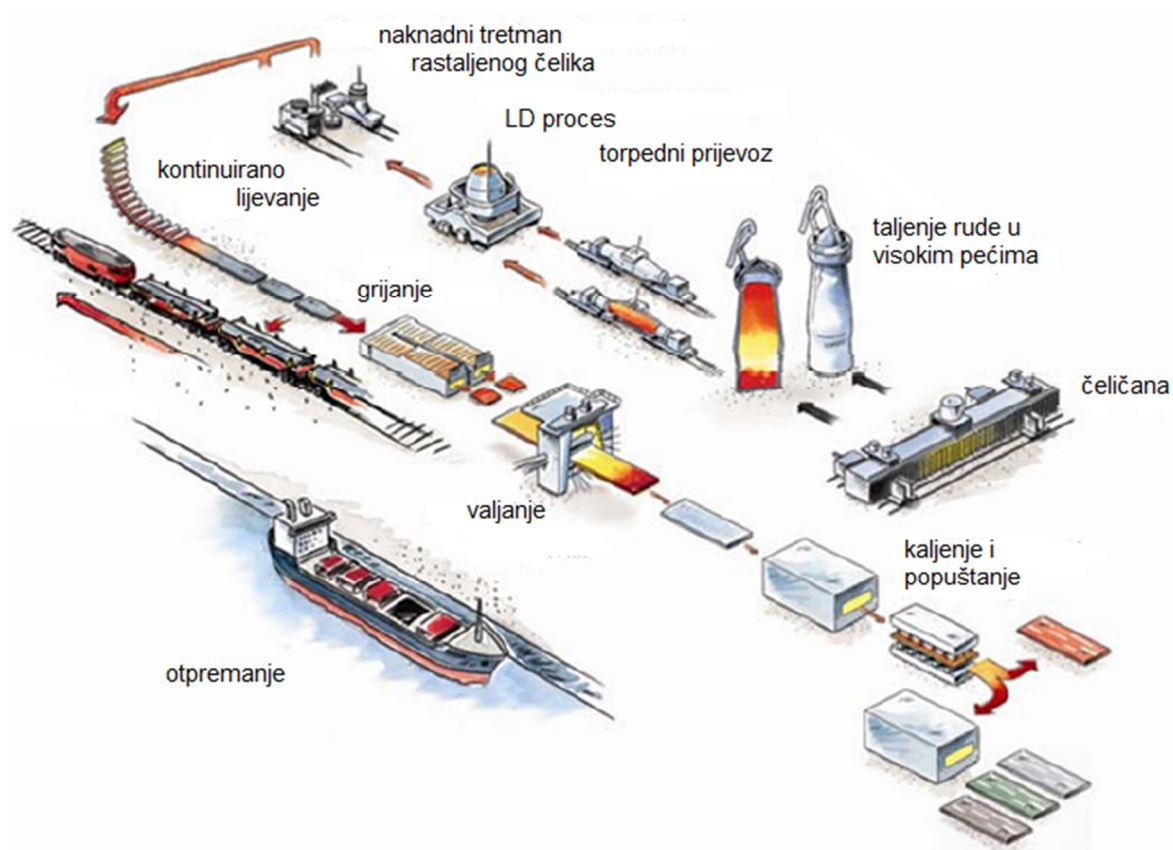
Stoga su metalni materijali posebno zanimljivi za primjenu u proizvodnji oklopa iz više razloga kao što su: svojstva, dostupnost, obradivost, fleksibilnost i cijena. [1]

2. OKLOPNI ČELICI VELIKE TVRDOĆE

Istraživanja diljem svijeta na području oklopnih materijala usmjerena su na razvoj tehnologija oklopa smanjene mase koji su otporni na probojnost kinetičkim protuoklopnim projektilima. Dok mnoge primjene uključuju korištenje metala niže gustoće od čelika, kao što su aluminij i titan, određena grupa čelika je i dalje primjenljiva zbog svojih dobrih balističkih svojstava i nezamjenjivih karakteristika kod konstruiranja. Mogućnost obrade komponenti oklopa u komercijalnim i vojnim područjima primjene s dostupnom opremom i osposobljenim kadrom glavna je prednost pri odabiru ovih čelika. Kako bi se što preciznije zadovoljili ovi zahtjevi počinju se osmišljati i proizvoditi oklopni ultra čvrsti čelici, u koje spadaju i oklopni čelici velike tvrdoće (OČVT) (eng. AHHS – Armor High Hardness Steel). [2]

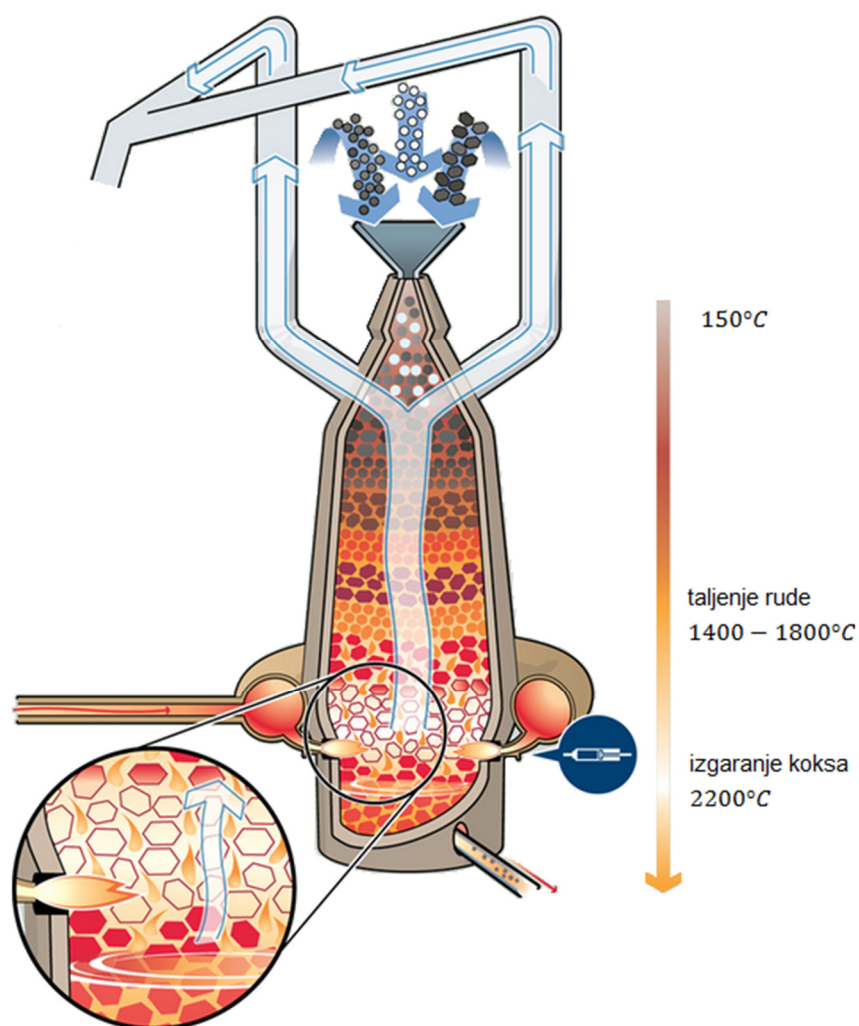
2.1. Proizvodnja OČVT

Kako bi se shvatila kompleksnost tehnologije koja stoji iza velike tvrdoće i ostalih karakteristika ovih čelika, važno je poznavati tijek procesa proizvodnje.



Slika 1. Proizvodni proces oklopnih čelika velike tvrdoće [3]

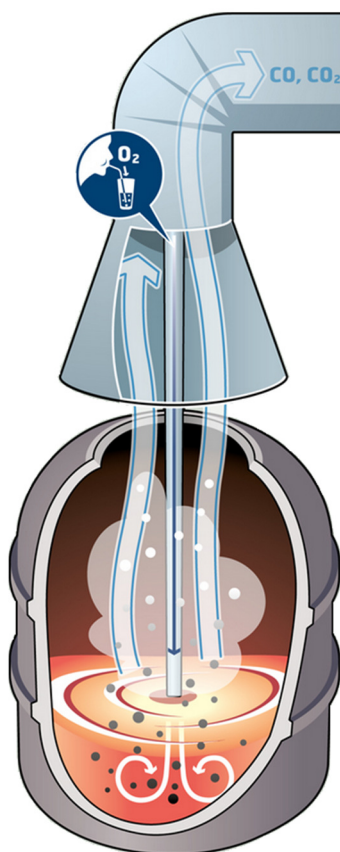
Oklopni čelici velike tvrdoće dobivaju se metalurškim procesima iz željezne rude (slika 1.). Po dolasku u čeličanu, ruda se kontinuirano dovodi u visoku peć (slika 2.). Proces koji se događa u velikoj peći je taljenje i redukcija kisika iz željezne rude, Fe_3O_4 . Kako bi se željezo oslobodilo od kisika, potrebno je dodati tvar koja će se vezati s kisikom na velikoj temperaturi, stoga se dodaje ugljik u obliku koksa, ugljen u prahu kao i neki aditivi za pospješivanje procesa. Ovaj se proces zove koksiranje. Temperatura u najtoplijoj zoni je $2200^{\circ}C$. Kada se sirovo željezo reducira i rastali, spušta se na dno visoke peći gdje se sakuplja i izlazi izvan peći.



Slika 2. Visoka peć [4]

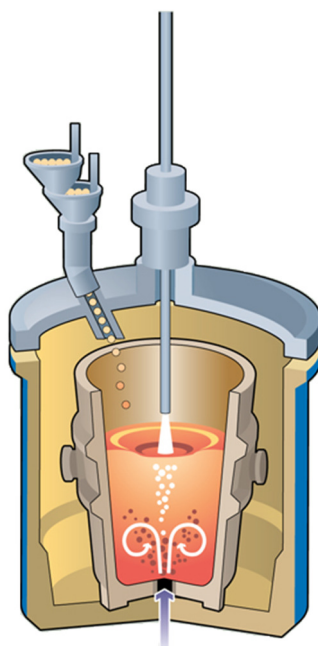
Po izlasku iz visoke peći, sirovo željezo se prevozi u rastaljenom stanju do kisikovog konvertera (slika 3.) u kojem se rafinira i postotak ugljika snizuje s 4,5 % na (1,7 do 1,5) % kako bi se dobio čelik koji se može kontinuirano lijevati i valjati.

U kisikovom konverteru upuhuje se zrak pod tlakom u talinu čime se temperatura podiže na 1600°C te kisik reagira sa ugljikom, silicijem i drugim elementima. Dodaje se i vapnenac koji se veže sa silicijem i drugim elementima kako bi stvorio šljaku. Nakon određenog vremena dodaju se svi potrebni legirajući elementi kako bi se stvorio legirani čelik okvirnog kemijskog sastava.



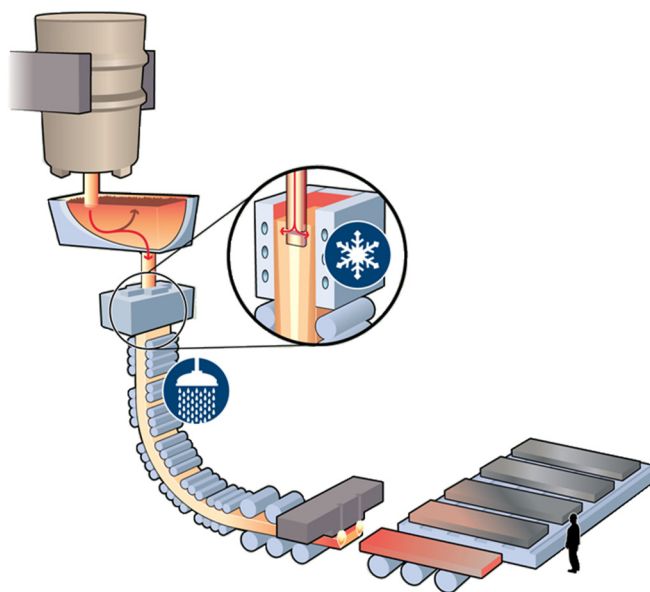
Slika 3. Kisikov konverter [4]

Sljedeći korak je prebacivanje rastaljenog čelika u ljevački lonac (slika 4.). U njemu se talina podvrgava raznim procesima u kojima se u uvjetima strogo kontrolirane temperature dodaju legirni elementi i aditivi doziranjem s velikom točnošću od čak jedne čestice u milijun čestica. Sve se odvija u vakuumskoj atmosferi kako bi se postigla zadovoljavajuća čistoća čelika, ponajviše zbog vodika koji je neželjeni element u tom čeliku.



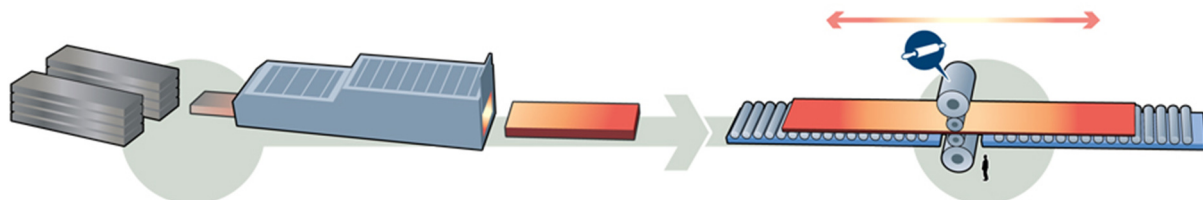
Slika 4. Ljevajući lonac [4]

Faza u procesu proizvodnje oklopnih čelika velike tvrdoće u kojoj se čelik solidificira je kontinuirano lijevanje. Pri 1600°C rastaljeni se metal lijeva u međuspremnik iz kojeg se istače u otvoreni kalup hlađen vodom. U njemu se prvo skrućuje vanjski sloj ploče pri temperaturi lijevanja od 1540°C nakon čega se kontinuirano hladi vodom što dovodi do kaljenja. Čelik je i dalje užaren, no potpuno skrutnut pri 1000°C , potom se plinski reže u struji kisika i ostavlja hladiti.



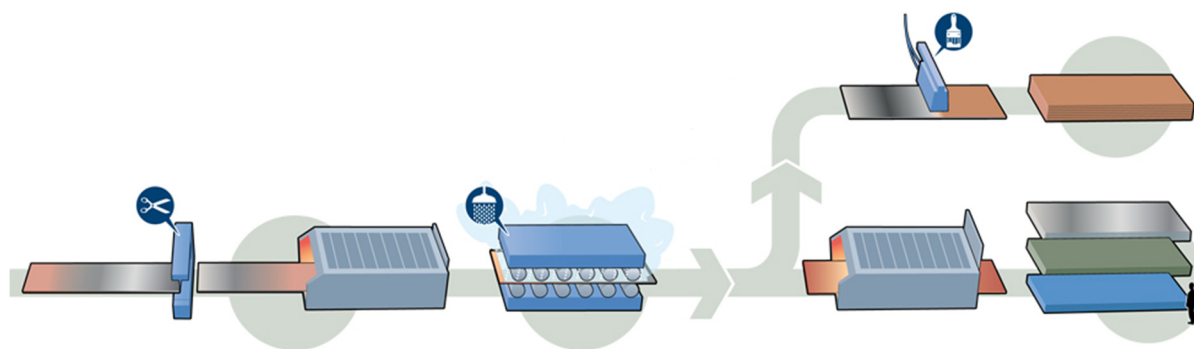
Slika 5. Kontinuirano lijevanje [4]

Kako bi se postigla zahtijevana mehanička svojstva, dobivene ploče je potrebno toplo deformirati valjanjem pri temperaturi od 1250°C uz prethodno čišćenje površine. Valjanje se izvodi pomoću valjačkih stanova kapaciteta 100000 kN. (slika 6.)



Slika 6. Toplo valjanje [4]

Završna toplinska obrada je gašenje limova brzinama od 1000°C/s uz pomoć vode pod velikim tlakom i popuštanje na $(200 - 500)^{\circ}\text{C}$ za postizanje velike čvrstoće. Rezanje na potrebne veličine, pjeskarenje i zaštita premazima je standardan postupak koji se provodi prije isporuke. (slika 7.)



Slika 7. Rezanje, popuštanje, gašenje, pjeskarenje i površinska zaštita premazom [4]

2.2. Svojstva OČVT

Eksplatacijski uvjeti materijala vojnih oklopnih vozila zahtijevaju vrlo dobra svojstva niza karakteristika. Oklopni čelici velike tvrdoće spadaju u skupinu niskolegiranih i niskopopuštenih ultračvrstih čelika koji u velikoj mjeri zadovoljavaju zahtijevana svojstva kao što su: relativno velika žilavost i dinamička izdržljivost, otpornost na koroziju, laka obradljivost odvajanjem čestica te zavarljivost. Ova svojstva ih čine dobrim izborom kod odabira materijala u konstruiranju oklopnih vozila. Njihova svojstva proizlaze iz mikrostrukture (2.2.2.) koja je rezultat kompleksnog proizvodnog procesa (2.1.) i odgovarajućeg kemijskog sastava (2.2.1.). (5) i (6)

2.2.1. *Kemijski sastav*

Promatrani čelici spadaju u skupinu legiranih čelika. Kako bi čelik imao neka posebna svojstva koja su rezultat dodavanja legiranih elemenata a ujedno i kako bi se mogao zvati legiranim čelikom, potrebno je u sastavu tog čelika imati neki od sljedećih elemenata: Si, Mn, Cr, Ni, W, Mo, V, Co, Ti, Cu, Al, B, Nb i/ili Ta. Da bi se neki od navedenih elemenata smatrao legirajućim, njegov maseni udio treba biti veći od udjela navedenog u tablici 1. U suprotnom, element nema dovoljnog utjecaja na svojstva čelika te ga se naziva primjesom. [6]

Tablica 1. Granica između primjese i legirajućeg elementa za pojedine kemijske elemente [6]

	gornja granica masenog udjela primjese, %		gornja granica masenog udjela primjese, %
Al	0,1	Nb	0,06
Cu	0,4	Pb	0,4
B	0,0008	Si	0,5
Co	0,1	Ti	0,05
Cr	0,3	V	0,1
Mn	1,8	W	0,1
Mo	0,08	Ni	0,3
Ostali elementi osim C, P, S, N i O		0,5	

Ugljik se, kada se govori o čelicima, ne smatra legirnim elementom. Primjese kao što su Si i Mn su uvijek prisutne budući da moraju zaostati u čeliku od metalurškog procesa dezoksidacije i desulfurizacije. Prisutni elementi P i S (rjeđe i As, Sn i Sb) su nečistoće. Po dogovoru, ako je zbroj masenih udjela svih legirajućih elemenata u čeliku manji od 5%, čelik se smatra niskolegiranim. Na primjer, ARMOX® 500T ili ATI 500-MIL™ su čelici velike tvrdoće, čiji je kemijski sastav prikazan u tablici 2 iz kojeg se može vidjeti da su to niskolegirani čelici. [2] i [6]

Tablica 2. Kemijski sastav čelika ARMOX® 500T i ATI 500-MIL™ [2] i [4]

Maseni udio	ARMOX® 500T	ATI 500-MIL™
C max %	0,32	0,22-0,32
Si %	0,1-0,4	0,25-0,45
Mn max %	1,2	0,8-1,2
P max %	0,015	0,02
S max %	0,01	0,005
Cr max %	1,0	1,6-2,0
Ni max %	1,8	3,5-4,0
Mo max %	0,7	0,22-0,37
B max %	0,005	-
Fe	ostatak	ostatak

2.2.1.1. Utjecaj legirnih elemenata

Svaki legirni element pridonosi određenim svojstvima čelika, a često djeluje i s drugim legirnim elementima. Utjecaj najčešćih legirnih elemenata OČVT-a na značajna svojstva kod proizvodnje, obrade i uporabe prikazan je u nastavku:

- Ugljik, C:** Nije legirni element čelika, već njegov sastavni dio. Za veći dio čelika on je najvažniji element i najviše utječe na svojstva čelika. Njegov maseni udio kreće se od nekoliko stotinki postotka do otprilike 2 %. Povećavajući udio ugljika, povećava se čvrstoća i granica razvlačenja, a smanjuju se duktilna svojstva. O ugljiku direktno ovisi zakaljivost čelika.
- Silicij, Si:** Povišuje eutektoidnu temperaturu A_1 . Jak dezoksidator. Usporava pretvorbu iz austenita što omogućuje lakše zakaljivanje. Povišuje granicu razvlačenja. Smanjuje veličinu zrna i sprječava stvaranje mekih željeznih karbida.
- Mangan, Mn:** Dezoksidator i desulfurizator, spajanjem u MnS sprječava negativno djelovanje željeznog sulfida FeS. Gamageni element koji snižava A_1 i A_3 temperature Karbidotvorac je. Vrlo povećava zakaljivost, a nezakaljenim čelicima povećava čvrstoću.

- Fosfor, P: Nepoželjna primjesa čiji maseni udio treba biti ispod 0,06 %. Fosfor čini sa željezom supstitucijski kristal mješanac. Zbog vrlo male brzine difuzije fosfor izvanredno jako segregira tijekom skrućivanja, zbog čega je vrlo teško dobiti jednoličan raspored fosfora. Uzrokuje krhkost u hladnom stanju time što je u čeliku više ugljika, što je bila viša temperatura austenitizacije te što je niži stupanj prokaljivanja čelika. Glavni je uzročnik krhkosti visokotemperaturnog popuštanja.
- Sumpor, S: Nepoželjna primjesa u čelicima i njegov je najveći dopušteni udio 0,05 %. Sa željezom tvori nepoželjan FeS koji se pojavljuje po granicama zrna. Uzrokuje veliko segregiranje čelika, raslojavanje između ferita i perlita te ima nisko talište (985°C) što uzrokuje lomove uslijed toplog valjanja i kovanja. Povoljan je pri obradi odvajanjem čestica zbog smanjivanja trenja između obratka i alatne oštrice.
- Krom, Cr: Jak karbidotvorac, stvara tvrde karbide od cementita, Cr_7C_6 i Cr_{23}C_6 . Povišuje zakaljivost čelika tako da se čelici mogu hladiti u ulju ili na zraku, snizuje M_s temperaturu. Povećava otpornost na tlak i trošenje. Alfageni je element. Nešto smanjuje žilavost i povećava krhkost popuštanja koja se neutralizira legiranjem molibdenom. Djeluje na smanjenje toplinske vodljivosti i toplinske rastezljivosti.
- Nikal, Ni: Izraziti gamageni element, povećava područje austenitizacije čelika. Usporava pretvorbu iz austenita. Povećava žilavost i snizuje prijelaznu temperaturu. Ne stvara karbide. Pozitivno utječe na korozijsku postojanost u kombinaciji s kromom. Smanjuje toplinsku vodljivost i toplinsku rastezljivost čelika. Zbog visoke cijene gotovo se uvijek legira u kombinaciji s drugim kemijskim elementom.
- Molibden, Mo: Jedan od glavnih legirnih elemenata čelika. Jak karbidotvorac. Stvara izomorfne heksagonalne karbide Mo_2C definiranog štapićastog oblika koji su odgovorini za sekundarno otvrdnuće. Potiče sitnozrnatost dispergiranim karbidima na mjestima dislokacija koji služe kao nukleacije. Povišuje eutektoidnu temperaturu A_1 . Sprječava krhkost visokotemperaturnog popuštanja i povećava prokaljivost čelika. Uz prisutnost kroma povećava

otpornost na opću, a posebno na „pitting“ koroziju. Povoljno reagira s drugim legirnim elementima.

Bor, B: Dodaje se u čelike iz samo jednog razloga - kako bi povećao zakaljivost podeutektoidnih čelika. Njegov utjecaj raste sa smanjenjem zrna u austenitnoj strukturi. Dodaje se u vrlo malim količinama, u rasponu (0,0005 - 0,003) %. Veća količina bora uzrokuje pad žilavosti zbog precipitata sa željezom, Fe_2B . Ne snizuje M_s temperaturu. [6, 7, 8]

2.2.2. Mikrostruktura

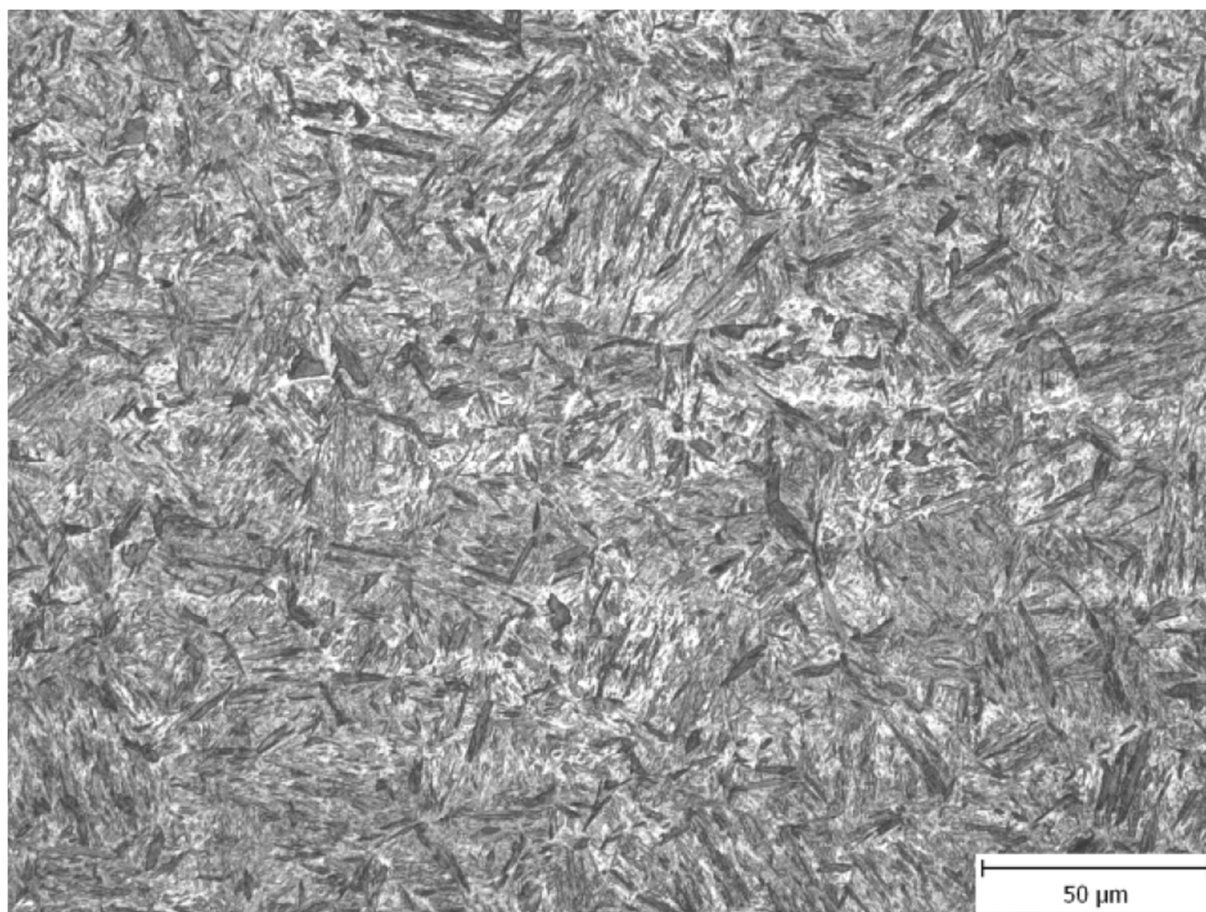
OČVT posjeduju izvanredna svojstva kao što su velika tvrdoća, čvrstoća i relativno visoka žilavost. Svojstva su posljedica mikrostrukture. Mikrostruktura čelika rezultat je kemijskog sastava i proizvodnog procesa. Primjer mikrostrukture OČVT prikazan je na slici 8.

Kako su visokočvrsti materijali osjetljivi na koncentrirana naprezanja (oštri prijelazi, nemetalni i metalni uključci), pri proizvodnji je potrebno paziti na čistoću čelika kako bi se izbjegli koncentrotori naprezanja-lokalne heterogenosti, uključci, segregacije, izlučine i štetne primjese; ali ih ne treba izbjegavati u atomarnom i submikronskom području jer je poželjno postići jednolično gibanje dislokacija.

2.2.2.1. Mehanizmi očvrsnuća ultra čvrstih čelika

Postignuće visokočvrstog stanja povezano je s postignućem metastabilnog strukturnog oblika s visokom razinom mikronepravilnosti, visokom gustoćom defekata kristalne rešetke (dislokacije i vakancije), a prema tome i s visokom sklonošću prema difuzijskim procesima. Ovdje treba iznimnu pozornost obratiti na prodor vodika koji posljedično uzrokuje vodikovu krhkost.

Mehanizmi očvrsnuća koji djeluju u visokočvrstim čelicima pa tako i u OČVT su sljedeći: očvrsnuće putem kristala mješanaca, transformacijsko očvrsnuće (kaljenje), očvrsnuće precipitacijom, očvrsnuće hladnom i toplom deformacijom (kod OČVT je topla deformacija) te očvrsnuće usitnjenjem kristalnih zrna. Očvršćenje usitnjenjem kristalnih zrna je posebno prikladno jer smanjuje prijelaznu temperaturu, a u isto vrijeme povisuje granicu razvlačenja.



Slika 8. Mikrostruktura ARMOX® 500T čelika [5]

Kontrolirana formacija i interakcija legirnih elemenata s mikrostrukturom tijekom proizvodnog procesa postiže se termomehanički kontroliranim procesom. Legirni elementi tako koče rast austenitnih zrna, odgađaju rekristalizacijski proces tokom toplog valjanja ili precipitacijski očvršćuju tijekom hlađenja. Isto tako, uvjeti hlađenja imaju važan utjecaj na mikrostrukturu čelika zbog toga što oni određuju fazu u kojoj će se on završno naći. Elementi poput C, Mn, Ni, Mo, B ponajviše utječu na kočenje transformacije iz austenita u ferit.

Optimiziranjem ovog procesa količina legirnih elemenata može se značajno reducirati što dovodi do malih vrijednosti ugljikovog ekvivalenta, smanjena osjetljivosti na hladne pukotine te izvrsne zavarljivosti pri nižim temperaturama predgrijavanja. [16, 6]

2.2.3. Svojstva

OČVT posjeduju kombinaciju dobrih balističkih svojstava i izvrsne žilavosti, tablica 3. Uz ova svojstva imaju dobru obradivost odvajanjem čestica i zadovoljavajuću zavarljivost.

U ovom poglavlju ukratko su obrađena područja osnovnih svojstava, izuzev svojstva zavarljivosti i balističkih svojstava, koja će biti obrađena u zasebnim poglavljima. [4, 9]

2.2.3.1. Fizikalna svojstva

Važnija fizička svojstva su gustoća, koeficijent toplinskog širenja i koeficijent toplinske provodnosti. Njihove vrijednosti kreću se oko $\delta = 7,85 \text{ g/cm}^3$, $\alpha_{(20-100)^\circ\text{C}} = 11,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ i $k = 52 \text{ W} / (\text{m} \cdot \text{K})$. [4, 9]

2.2.3.2. Mehanička svojstva

OČVT spadaju u ultra čvrste čelike ($R_{p0,2} > 1000 \text{ N/mm}^2$). Najvažnija mehanička svojstva dana su u tablici 3. [4, 9]

Tablica 3. Mehanička svojstva čelika ARMOX® 500T i ATI 500-MIL™ [2] i [4]

	ARMOX® 500T	ATI 500-MIL™
Tvrdoća, HBW	480-540	477-534
Udar na radnja loma, Charpy-V, -40°C , min. J	25,0	27,0
Granica elastičnosti, $R_{p0,2}$, min. MPa	1250,0	1034,0
Vlačna čvrstoća, R_m , MPa	1450-1750	1792,0
Istezljivost, A_5 , min %	8,0	13,0
Istezljivost, A_{50} , min %	10,0	13,0

2.2.3.3. Rezljivost

Zbog velike osjetljivosti na povišen unos topline, preporučene tehnologije rezanja su: abrazivno rezanje vodenim mlazom, rezanje na pili i rezanje abrazivnim diskom. Plazma i lasersko rezanje je dopušteno za manje debljine, no treba imati na umu kako tim metodama nastaje zona utjecaja topline, ZUT. Plinsko rezanje nije preporučljivo, a ukoliko se provodi, potrebno je vršiti predgrijavanje i naknadnu toplinsku obradu. [9]

2.2.3.4. Obrada odvajanjem čestica

Važno svojstvo ovih čelika je obradljivost odvajanjem čestica u poboljšanom stanju. Preporučeni rezni materijali su brzorezni čelici ili cementirane karbidne prevlake. Prilikom

obrade treba paziti na: mali posmak, obilno hlađenje kako bi se izbjegao ZUT, fiksiranost radnog komada i dovoljnu krutost cijelog radnog stola te na sve ostale mjere potrebne za izbjegavanje vibracija. [9]

2.2.3.5. Deformiranje

OČVT se do određene mjere mogu savijati. Potencijalni problem je velika tvrdoća koja postavlja relativno visoke zahtjeve za kalup u koji se savija. Omjer između polumjera savijanja R i debljine lima t , R/t , kreće se u rasponu 5 – 9 ovisno o debljini i smjeru savijanja. Kut elastičnog povratka iznosi $12^\circ - 20^\circ$. [9]

3. ZAVARENI SPOJ OKLOPNIH ČELIKA VELIKE TVRDOĆE

Kad se govori o tehnologiji zavarivanja OČVT-a potrebno je paziti na cijeli niz utjecajnih faktora koji su vrlo često u kompleksnoj međusobnoj relaciji zbog načina proizvodnje i legiranih elemenata, a posljedično, i mehanizama očvrsnuća koji se javljaju u njima.

Tijekom zavarivanja, u ZUT-u se mijenja mikrostruktura uslijed unosa topline. U neposrednoj blizini rastaljenog metala zagrijavanje osnovnog materijala je veliko, iznad temperature A_3 . U ovom temperaturnom području redovito se postiže nepoželjno pogrubljenje zrna i povećanje krhkosti. Dalje od linije staljivanja, temperatura je niža, a ukoliko je viša od A_1 doći će stvaranja mekanih zona unutar mikrostrukture. Drugim riječima, unesena toplina potaknut će precipitaciju karbida i karbonitrida, a istovremeno i dodatno odžariti materijal što će dovesti do prevelikog omekšanja. [16]

Uz ove potencijalne probleme, zbog načina očvrsnuća i fizikalna svojstva, OČVT su podložni i vodikovoj krhkosti. Kako se vodikova krhkost najčešće rješava predgrijavanjem ili skupljom opcijom, izborom dodatnog materijala, optimalnu tehnologiju zavarivanja potrebno je vrlo pažljivo odabrati.

Stoga se dva faktora vezana za unos topline posebno ističu i suprotstavljaju te im zbog toga treba dati posebnu pozornost. Jedan je sklonost ovih čelika hladnom lomu zbog utjecaja vodika, a nasuprot njemu javlja se problematika normalizirane zone ZUT-a u kojoj dolazi do znatnog pada mehaničkih svojstava.

Postupci prikladni za zavarivanje OČVT su: GMAW (Gas Metal Arc Welding), FCAW (Flux Cored Arc Welding), TIG (Tungsten Inert Gas), SMAW (Shielded Metal Arc Welding), SAW (Submerged Arc Welding), itd. Zbog karakteristika procesa kao što su velik unos topline, nemogućnost dovoljno dobre zaštite metala zavara, mala prilagodljivost i mala produktivnost; najadekvatniji za zavarivanje OČVT-a su elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom GMAW i elektrolučno zavarivanje praškom punjenom taljivom žicom FCAW te njihove varijante.

3.1. Mikrostruktura

Mikrostruktura osnovnog materijala je kompleksna zbog proizvodnog procesa koji optimizira relativno male masene udjele legirnih elemenata i tako postiže vrlo dobra svojstva (tablica 3).

Stoga se može zaključiti kako je ovakav proces proizvodnje u kombinaciji s balansiranim kemijskim sastavom osnovnog materijala nemoguće postići u zavarenom spoju. Kako bi se postigla potrebna svojstva, u procesu zavrivanja potrebno je dodavati dodatni materijal koji je više legiran zbog toga što su u metalu zavara prisutna samo dva mehanizma očvršnuća: očvršnuće precipitacijom i očvršnuće skrućivanjem u krutoj otopini. Nadalje, kemijski sastav osigurava transformaciju u bainitnu i/ili martenzitnu strukturu metala zavara.

Da bi metal zavara imao optimalna svojstva, potrebno je uzeti u obzir kemijski sastav osnovnog materijala, kemijski sastav dodatnog materijala, njihovo međusobno miješanje i brzinu hlađenja. [16]

3.2. Unos topline

Jedna od najvažnijih veličina za proučavanje toplinskih utjecaja kod zavarivanja na strukturne promjene, deformacije a time i zaostale napetosti, je količina unesene topline. Jedinica koja se koristi je izražena kao unesena toplina po duljini zavarenog spoja. Prema HRN EN 1011-2 izraz za unos topline glasi:

$$Q = \frac{U \cdot I}{v_z} \cdot \eta, \left(\frac{J}{mm} \right), \quad (1)$$

gdje je:

Qunesena toplina, $\frac{J}{mm}$

Unapon struje izvora, V

v_z brzina kretanja izvora, brzina zavarivanja, $\frac{mm}{s}$

Ijakost struje izvora, A

ηiskoristivost

Unos topline kod elektrolučnih procesa ostvaruje se, električnim lukom. Kako bi se pobliže mogli objasniti zavarivački procesi, potrebno je znati što je električni luk.

3.2.1. Električni luk

Električni luk je pražnjenje elektriciteta u plinovima između elektroda uz visoke temperature, visoku gustoću struje, s jakom termoelektronskom i fotoelektronskom emisijom. [17]

3.2.1.1. Karakteristike električnog luka

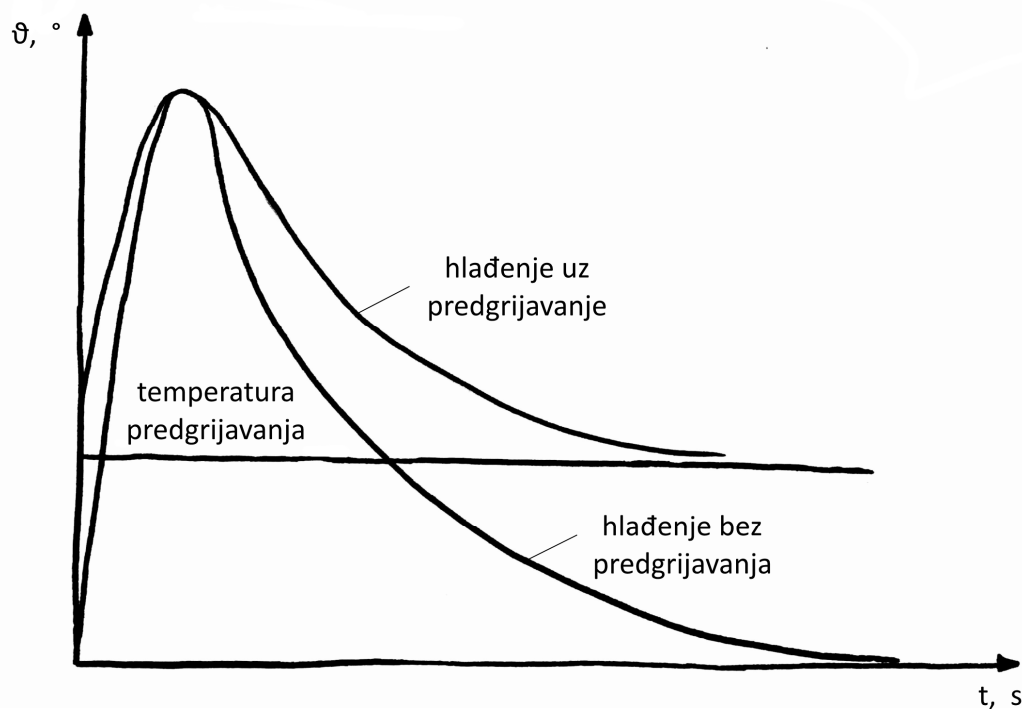
- U njemu se nalaze plinovi u stanju plazme i metalne pare pri zavarivanju;
- dobro provodi električnu struju;
- ima određenu duljinu, napon i električni otpor;
- oko električnog luka stvara se magnetsko polje, isto kao i oko vodiča;
- toplinski je provodljiv;
- zrači elektromagnetska zračenja: zračenje vidljivog dijela spektra, ultraljubičasto i infracrveno zračenje;
- ima visoku temperaturu 6000 °C – 8000 °C
- strujanje vrućih plinova je usmjereno prema gore, a tlak električnog luka na površinu taline;
- kod zavarivanja dolazi do prijelaza kapljica metala kroz električni luk, a tako i do reakcija kapljica s atmosferom luka ukoliko nije inertna. [17]

3.2.2. Predgrijavanje

Predgrijavanje je zagrijavanje područja zavarivanja iznad temperature okoline na propisanu temperaturu prije početka zavarivanja. Uz zavarivanje, predgrijavanje je jedno od važnijih unošenja topline u zavareni spoj.

Cilj predgrijavanja kod OČVT-a je prvenstveno izbjegavanje hladnih pukotina na način da se omogući izlazak difundiranog vodika iz metala tijekom duljeg vremenskog perioda na

povišenoj temperaturi (slika 9), jer je srednji razmak između atoma veći. Nadalje, predgrijavanjem se postižu efekti suprotni onima koji uzrokuju hladne pukotine: krhke zakaljane faze, zaostala naprezanja i već navedeni difundirani vodik. [17]



Slika 9. Brzina hlađenja s predgrijavanjem i bez njega

3.2.2.1. Proračun temperature predgrijavanja

Za određivanje temperature predgrijavanja potrebno je obratiti pozornost na čimbenike koji utječu na razlog predgrijavanja – hladni lom. To se najjednostavnije postiže uzimajući u obzir kemijske elemente koji utječu na zakaljivost, a time i na tvrdoću, što je direktno u vezi s vodikom potpomognutim hladnim lomom. Svaki kemijski element različito utječe na zakaljivost.

Izraz koji opisuje zakaljivost koja se temelji na kemijskom sastavu zove se ugljikov ekvivalent (eng. CE, carbon equivalent content).

OČVT spadaju u grupu niskolegiranih čelika, koji se proračunavaju, prema preporuci IIW-a (International Institute of Welding) prema sljedećem izrazu:

$$CE_{IIW} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} \quad (2)$$

Kada je određen ugljikov ekvivalent, prema eksperimentalno dobivenim izrazima određuje se kritična brzina hlađenja iznad koje nema opasnosti nastanka hladnih pukotina, a shodno njoj i temperatura predgrijavanja.

3.3. Greške zavarenog spoja

Kod zavarenih spojeva mogu se pojaviti razne greške. Greške zavarenih spojeva dijele se na:

- pukotine;
- poroznost (plinski uključci i druge praznine);
- čvrsti nemetalni i metalni uključci (troska, prašak za zavarivanje, metalni oksidi: Fe, Al,..., uključci stranih metala: W, Cu, ...);
- neprovaren korijen i greške vezivanja;
- nepravilnosti oblika: zajede, nadvišenja, prokapljine u korijenu, denivelacije rubova, kutne deformacije;
- ostale nepravilnosti: mjesta paljenja luka, kapljice metala nastale prskanjem.

Navedenih 6 grupa grešaka zavarenih spojeva detektiraju se obično defektoskopijom – ispitivanjem bez razaranja. One nastaju pri zavarivanju i nazivaju se proizvodnim greškama. Pored proizvodnih grešaka, koje predstavljaju diskontinuitete u materijalu, razlikuju se još i:

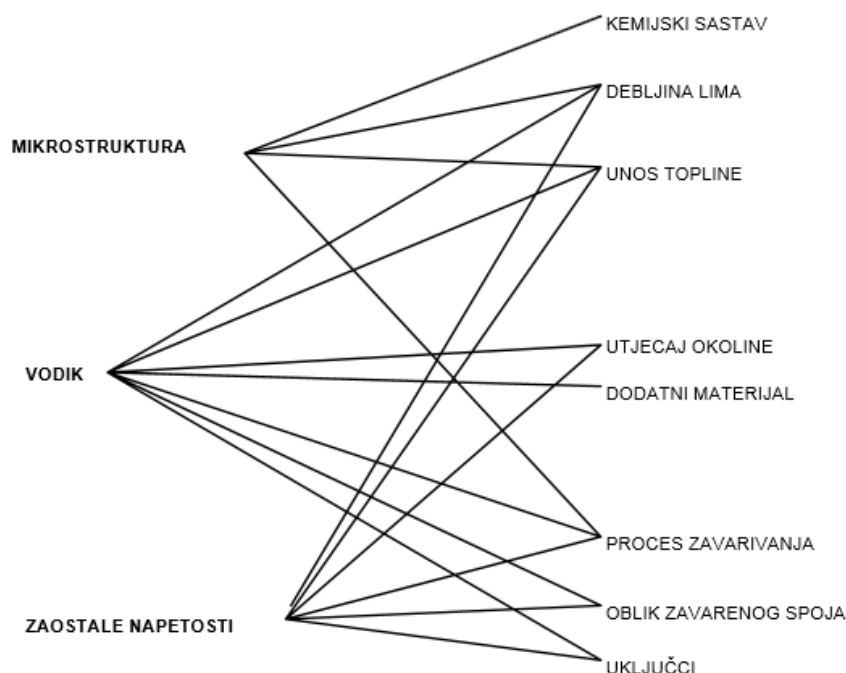
- metalurgijske;
- geometrijske;
- konstrukcijske greške. [17]

Kod zavarivanja OČVT-a, ukoliko se ne prati propisana tehnologija, postoji povećana opasnost od pojave hladnih pukotina.

3.3.1. Hladne pukotine

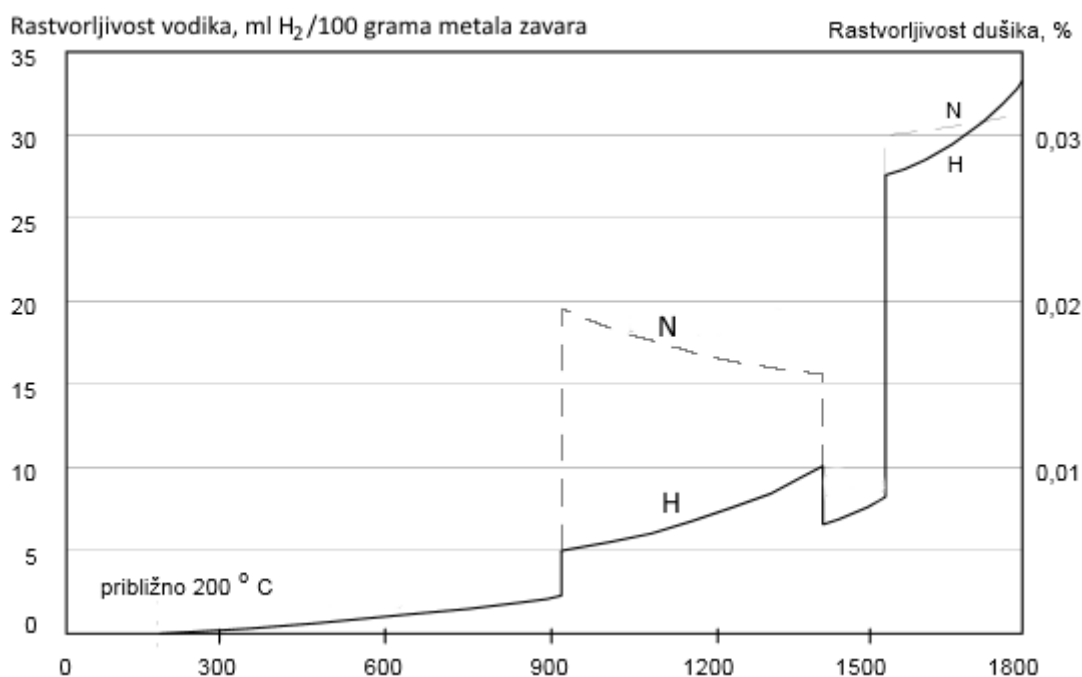
Nastaju nakon izvršenog zavarivanja na temperaturi nižoj od 200°C. Nazivaju se i zakašnjele hladne pukotine. Mogu se pojaviti i nekoliko dana nakon zavarivanja. Položene su uzdužno ili poprečno na zavar ili na prijelazu u osnovni materijal. S obzirom na smjer rasprostiranja postoje longitudinalne i transverzalne pukotine. Mogu biti vidljive i nevidljive za ljudsko oko odnosno mikro ili makro pukotine.

Za nastajanje hladnih pukotina nužni su preduvjeti prikazani na slici 9.



Slika 10. Uzročnici nastajanja pukotina [18]

Nastajanje hladnih pukotina je vrlo složen postupak. Vodik se u talini zavora pri visokim temperaturama nalazi u atomarnom stanju. Zbog svojih vrlo malih dimenzija vrlo lako prolazi kroz kristalnu rešetku željeza. Pri hlađenju zbog manje rastvorljivosti u željezu na nižim temperaturama (slika 11) vodik teži prijeći u molekularno stanje i smjestiti se na mjestima gdje ima mjesta za njegovu molekulu. Lokacije na kojima se vodik može nakupljati su greške. Uslijed gomilanja vodika tlak raste. Zbog utjecaja visokih tlakova, greške se povezuju u veću ili manju pukotinu, posebice kada još dodatno djeluje veliko naprezanje nastalo zbog skupljanja metala zavora. [18]



Slika 11. Rastvorljivost vodika u čistom Fe [18]

Najveći uzročnik nastajanja hladnih pukotina je H_2 . On dolazi u zavar razlaganjem vlage na velikim temperaturama, obično se nalazeći u oblozi elektrode, zaštitnom plinu, prašku ali i iz drugih nečistoća koje se nalaze na površini mjesta zavara kao što su: vlaga, hrđa, masnoća, itd. Na površini loma mogu se uočiti tzv. „riblje oči“, to su karakteristične pojave za vodikom izazvane hladne pukotine.

3.4. Razvoj tehnologije zavarivanja

Zavarivanje i zavarljivost oklopnih čelika visoke čvrstoće jedno je od glavnih problematika njihove ispravne upotrebe. Osim balističkih svojstava, potrebno je imati na umu dvije stvari: mikrostrukturu osnovnog materijala koja se nalazi u ZUT-u i dovoljna mehanička svojstva metala zavara.

Uobičajena metoda proizvođača čelika je ispitivanje svojstava raznim stvarnim i/ili simuliranim toplinskim ciklusima. Razlog ovome je određivanje maksimalnog i minimalnog unosa topline unutar kojeg se događa prihvatljiva degradacija materijala. Hlađenje se promatra unutar vremenskog perioda $t_{8/5}$ (vrijeme potrebno za prijelaz temperaturnog područja između 500°C i 800°C) jer se u tom vremenskom i temperaturnom periodu određuje mogućnost nastanka mikrostrukturnih promjena.

S druge strane proizvođač dodatnog materijala razvija kemijski sastav dodatnog materijala i dobiva svojstva za čisti metal zavara kakva su propisana normama za dodatne materijale. Stoga, svojstva zavara dobivenih ovakvim ispitivanjima nisu u potpunosti usporedivi sa stvarnim svojstvima zavarima.

U realnoj proizvodnji, osnovni i dodatni materijal dolaze u interakciju određenim postupkom zavarivanja nakon čega se, zbog različitosti materijala i nepredvidivosti, ispituju mehanička svojstva zavarenog spoja koja su tada glavni pokazatelj kvalitete.

Tokom takve ovakve uhodane procedure potrebno je paziti kod zavarivanja OČVT-a na nekoliko stvari:

1. Obratiti pozornost na postojanje određenog miješanja osnovnog metala i metala zavara, ovisno o zavarivačkom procesu i parametrima zavarivanja. Ovo znači da metal zavara može imati značajno drukčiju kemijski sastav od čistog dodatnog materijala koji je tim kemijskim sastavom zadovoljio uvjete. Stoga je jasno da su svojstva stvarnog zavarenog spoja drukčija od deklariranih od strane proizvođača dodatnog materijala. Danas se sve više teži klasificiranju čelika i prema kemijskom sastavu, a ne samo prema njegovim svojstvima. Ovo značajno olakšava izbor dodatnih materijala i ostvarivanje očekivanih svojstava zavarenog spoja.
2. Nadalje, u obzir je potrebno uzeti to da je čvrstoću i žilavost zavarenog spoja moguće dobiti jedino čvrstom otopinom i precipitacijskim očvrsnućem. Ne postoje druge mogućnosti očvrsnuća osim rafinacijom kristalnih zrna i očvrsnućem dislokacijama kao kod osnovnog materijala. U tome leži razlog zašto metal zavara treba biti više legiran od osnovnog materijala koji tako može dovesti do povećane osjetljivosti na pojavu krhkosti i hladne pukotine u usporedbi s osnovnim materijalom.
3. Ovisno o debljini materijala potrebno je primjenjivati različite tehnike. Za tanje limove preporučuje se zavarivanje u jednom prolazu, za deblje limove u dva prolaza, dok se debeli limovi zavaruju u više prolaza. Iako se zavaruje istim dodatnim materijalom, mehanička svojstva nakon primijenjenih različitih tehnika značajno se razlikuju: Kod zavarivanja u jednom prolazu, mikrostruktura je usporediva s onom lijevanog čelika bez toplinske obrade. Kada se zavaruje u više prolaza, naredni prolazi odžaruju prethodne te zavareni spoj ima mikrostrukturu nalik poboljšanom čeliku. Očito je da tehnologija zavarivanja ima važan utjecaj na svojstva zavarenog spoja. U slučaju višeprolaznog zavarivanja slične se

pojave pojavljuju i u ZUT-u prethodnih prolaza. Kada se želi postići sitnozrnatost u metalu zavora, koristi se zavarivanje u mnogo tankih prolaza.

Najvažniji pristup zavarivačkom procesu je optimalno podešavanje parametara (jakost struje, napon struje, brzina dodavanja žice i brzina zavarivanja). Unos topline je potrebno prilagoditi debljini osnovnog materijala kako bi se postigla optimalna svojstva procesa. Previše topline može doprinijeti velikom padu čvrstoće i smanjenoj trajnosti spoja. Ovo se može izbjeći ako se postavi ograničenje za debljinu omekšanja na 0,25 % debljine osnovnog materijala.

Osim reguliranja kemijskog sastava dodatnog materijala, kontrola unosa topline u zavar je jedna od najvažnijih stvari kod zavarivanja OČVT-a. Ukoliko je unos topline prenizak, sve je veća opasnost od neprotaljivanja, a ako je previsok, ZUT postaje prevelik i uzrokuje negativne utjecaje na zavareni spoj.

Unos topline, koji proizlazi iz parametara zavarivanja, rezultira određenim vremenom hlađenja $t_{8/5}$.

Drugi glavni problem kod zavarivanja OČVT-a je sprječavanje apsorbiranja H_2 tijekom zavarivanja. Izvori vodika mogu biti različiti:

- dodatni materijal (vlaga na površini žice, u prašcima, unutar obloge elektrode)
- osnovni materijal (korozijski produkti, boja, ulje i masti, anti korozijski premazi, prajmeri, tvari za sprječavanje lijepljenja kapljica prskanja tijekom zavarivanja)
- zavarivački postupak (dug električni luk, nedovoljna zaštita zaštitnim plinom, turbulencije unutar zaštitne atmosfere, curenje hladila u zavarivačkom pištolju, tvari za olakšavanje prolaska žice kroz vodilicu)
- okolina (vlaga u zraku, para, vjetar, brze izmjene temperature). [16]

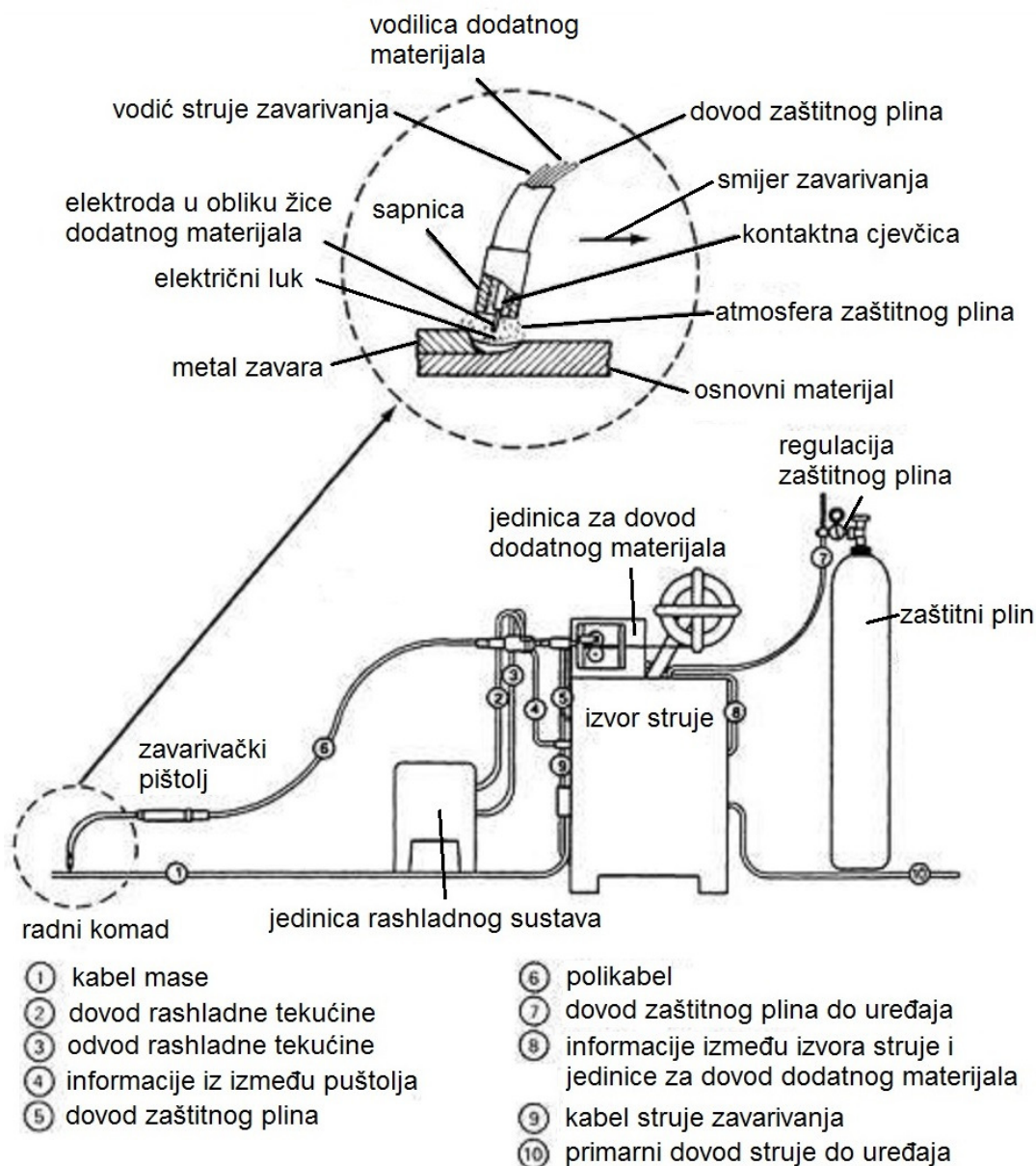
3.5. MIG/MAG i FCAW

Pošto su ova dva srodna postupka najprikladnija za zavarivanje OČVT-a u nastavku je dan detaljniji opis.

Oznaka GMAW postupka zavarivanja je 131 (MIG), ukoliko je korišten inertan, ili 135 (MAG) za aktivan plin zaštitne atmosfere. Oznaka za FCAW je 136 kada se koristi zaštitni.

3.5.1. O postupcima

Osnovne karakteristike MIG/MAG i FCAW postupaka su: uspostava i održavanje električnog luka između radnog komada i elektrode od pune žice koja je u isto vrijeme i dodatni materijal. Električni luk kontinuirano tali žicu koja se u rastaljenom stanju prenosi u talinu zavora. Metal zavora je zaštićen od okolne atmosfere zaštitnim plinom (FCAW-S postupak se provodi bez zaštitnog plina), slika 12. [11]



Slika 12. Shematski prikaz opreme i procesa GMAW postupka zavarivanja [11]

3.5.2. Parametri

Standardni GMAW i FCAW postupci ovise o nekoliko parametara zavarivanja:

- promjer dodatnog materijala;
- napon struje zavarivanja;
- jakost struje zavarivanja;
- brzina zavarivanja;
- dinamičke karakteristike izvora struje;
- slobodni kraj žice;
- izbor zaštitnog plina i protok plina;
- izbor dodatnog materijala;
- položaj zavarivačkog pištolja i zavarenog spoja;
- tehnika zavarivanja i način njihanja.

Većinu ovih parametara potrebno je međusobno uskladiti za optimalne rezultate. Kod ručnog zavarivanja, iskusan zavarivač će vrlo brzo pronaći odgovarajuće parametre, dok je usklađivanje parametara za automatizirane i robotizirane aplikacije nešto teže. [16]

3.5.2.1. Promjer dodatnog materijala

Promjer dodatnog materijala, žice, uzima se s obzirom na jakost struje zavarivanja. Za razliku od SMAW (Shielded Metal Arc Welding) postupka, jakosti struje kreću se svojim iznosom u širokim rasponima s obzirom na odabranu debljinu žice. Ti rasponi u kojima se kreće jakost struje za bliske promjere dodatnog materijala se relativno puno preklapaju. Kao pravilo, može se uzeti da je prijenos metala kod zavarivanja tanjom žicom stabilniji.

3.5.2.2. Napon struje zavarivanja

Povećanjem napona povećava se duljina električnog luka i dobiva šira talina. Ugorine su znak da je napon previsok. Ukoliko se koristi kratak električni luk, viši napon će smanjiti frekvenciju kratkih spojeva i time omogućiti stvaranje većih kapljica rastaljenog metala te više prskanja.

Prenizak napon može uzrokovati ulijetanje nerastaljene žice u talinu te otežano uspostavljanje električnog luka.

Kod tanjih radnih komada kratak električni luk daje mogućnost bržeg zavarivanja bez opasnosti od propaljivanja. Ovo se izvodi samo ukoliko je frekvencija kratkih spojeva i dalje dovoljno visoka i ako je električni luk stabilan.

Kutni zavari opterećeni na dinamička opterećenja moraju imati blage prijelaze jer se u suprotnom javljaju nepovoljna zarezna djelovanja između metala zavara i osnovnog metala. To se postiže ispravnim odabirom napona zavarivanja.

3.5.2.3. *Jakost struje zavarivanja*

O jakosti struje zavarivanja kod CV karakteristike (Constant Voltage, 3.5.4.1.) izvora struje ovisi količina rastaljenog materijala. U skladu s time, brzina dodavanja žice i njezin poprečni presjek određuju potrebnu količinu dodanog materijala za određenu jakost struje.

3.5.2.4. *Induktivitet*

Za ispravno postavljanje parametara zavarivanja za određeni promjer žice potrebno je koristiti ispravan induktivitet. Kratak električni luk je vrlo osjetljiv na induktivitet. Niske vrijednosti induktiviteta će imati prepoznatljiv zvuk i pružit će koncentrirani električni luk, ali u isto vrijeme će se povećati prskanje. Veće vrijednosti daju mekši zvuk i nešto širu talinu. Efekti induktiviteta mogu se poništiti povećanjem kapi prijenosa materijal.

3.5.2.5. *Slobodni kraj žice*

Slobodni kraj žice je onaj dio žice koji viri od kraja kontaktne cjevčice. Obično iznosi 10mm do 20mm. Prekratak slobodan kraj žice povećava rizik od zataljivanja elektrode za kontaktnu cjevčicu, dok predugačak povećava rizik od ermerm nerastaljene žice u talinu, posebno na početku zavarivanja.

Udaljenost kontaktne cjevčice, koja ovisi i o duljini slobodnog kraja žice, ima utjecaj na jakost struje i dubinu penetracije. Ukoliko je slobodni kraj žice povećan, jakost struje, a time i unos topline se smanjuje dok količina depozita ostaje ista. Ovime se smanjuje penetracija i dalje povoljan metal zavara u pogledu kemijskog sastava, ovime se povećava opasnost od naljepljivanja. Dobro je pridržavati se pravila da duljina slobodnog kraja žice tijekom zavarivanja treba biti konstantna.

3.5.2.6. *Zaštitni plinovi i prašci*

Zaštitni plin ili mješavina dva ili više plinova, osim što štiti talinu od utjecaja okolne atmosfere, služi za održavanje električnog luka, metalurške reakcije u rastaljenom metalu, postizanje penetracije te oblik i širinu taline – geometriju zavarenog spoja.

Svaki upotrebljeni plin daje u određenoj mjeri jedno ili više od ovih svojstvava te se prema potrebi kombiniraju kako bi se dobio željeni efekt.

Najčešće upotrebljavani zaštitni plinovi su: Ar, He, CO_2 , H_2 , O_2 i N_2 .

Argon je inertan plin koji kemijski reagira s drugim materijalima.

Helij je kao i argon inertan plin, daje veću penetraciju i unos topline u zavareni spoj, skup je. Ugljični dioksid je jeftin, osigurava dobru penetraciju ali uzrokuje štrcanje.

Vodik u malim količinama može se koristiti za povećanje unesene topline kao i helij, ali je značajno jeftiniji. Zbog opasnosti od vodika, može se koristiti samo za zavarivanje austenitnih čelika. Aktivno smanjuje okside pa se stoga upotrebljava za korijensku zaštitu.

Dušik se može koristiti kao legirni element nekih čelika, njegovim dodatkom u obliku zaštitnog plina može se kompenzirati gubitak tijekom zavarivanja.

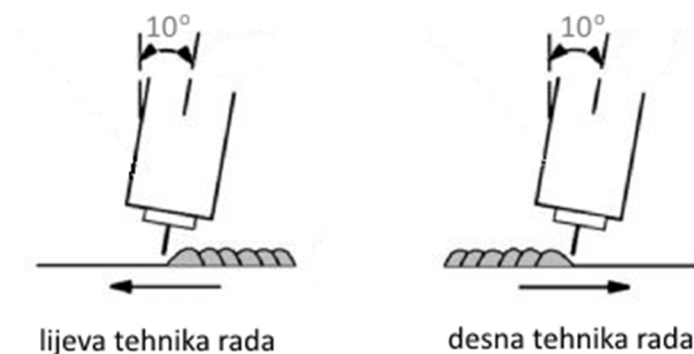
Protok zaštitnog plina potrebno je prilagoditi snazi električnog luka. Slabiji zahtijevaju manje protoke dok veće jakosti struja električnog luka moraju imati i veće protoke.

Kod FCAW postupka koriste se praškom punjene žice. Prašci imaju više uloga među kojima su najvažnije: zaštita metala zavora troskom, legiranje i rafinacija, oslobađanje plinova koji održavaju električni luk stabilnim, itd.

3.5.2.7. *Položaj zavarivačkog pištolja*

Nagib pištolja u odnosu na zavarivani spoj je važan parametar. Ukoliko se koristi lijeva tehnika rada, zavar će biti plići i širi. Desna tehnika rada će dati dublju penetraciju i uži zavar, slika 13.

Nagibi pištolja značajno mogu utjecati na naljepljivanje.



Slika 13. Tehnike rada [13]

3.5.2.8. Njihanje pištolja

Njihanje se ponekad koristi kako bi se premostili preveliki zazori ili dobio zahtijevan izgled završnog prolaza. Njime se kontrolira talina i postiže željeni efekt.

3.5.3. Prednosti i nedostaci

Među prednostima koje imaju GMAW i FCAW postupci najvažnija je velika produktivnost ovih postupaka i relativno nizak unos topline u radni komad te jednostavnost automatizacije i robotizacije. Za razliku od MMAW (Manual Metal Arc Welding) nema potrebe za učestalim zastojima zbog izmjene elektrode već je dovod žice kontinuiran. Jedna debljina žice može poslužiti za zavarivanje raznih debljina materijala.

Zavarivanje u prisilnim položajima je olakšano za FCAW postupak dok je za GMAW postupak nešto teže.

Izobrazba zavarivača je brza za osnovnu upotrebu dok je kod većih zahtjeva kompleksnija i dugo traje.

Nedostatak je kompleksnost opreme koja nekada predstavlja problem u pogledu konstantnog održavanja. Drugi nedostatak je, izražen samo kod GMAW-a, nemogućnost zavarivanja na vjetru.

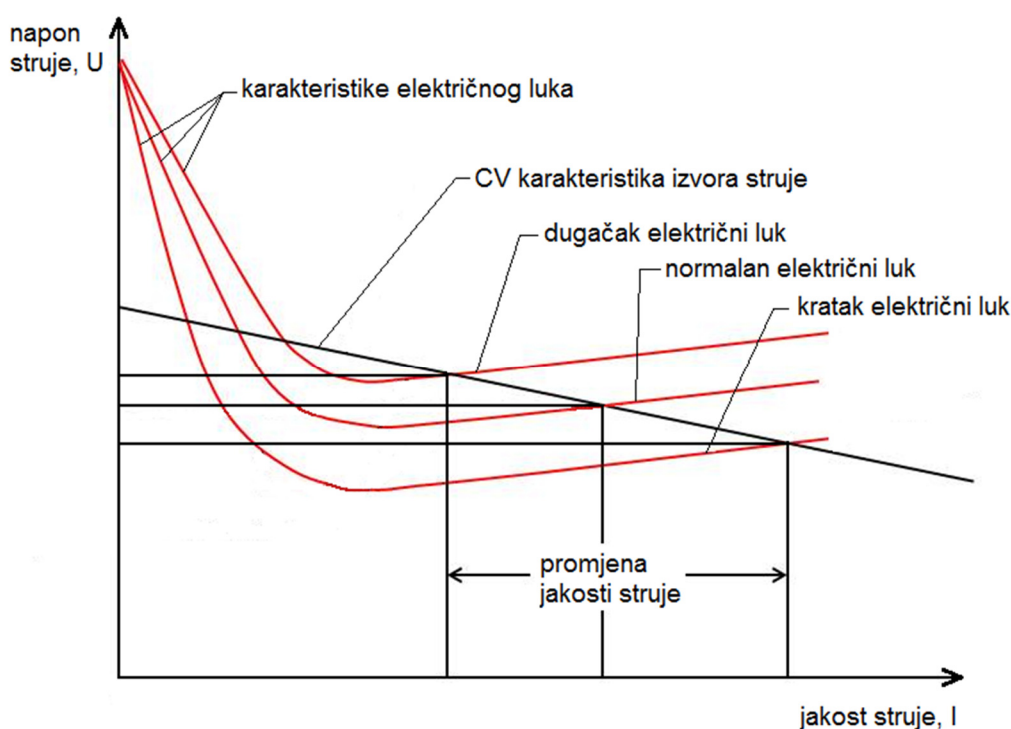
Jedan od najvećih problema je povećana opasnost od naljepljivanja ukoliko parametri i tehnika zavarivanja nisu ispravni. [16]

3.5.4. Kontrola postupka

Postupci GMAW i FCAW se obično kontroliraju automatski na jedan od dva načina: pomoću struje zavarivanja i pomoću kontroliranog pomicanja žice.

3.5.4.1. Struja zavarivanja

Kontrola postupka vrši se pomoću statičke karakteristike izvora struje, CV (Constant Voltage) što znači da je promjena napona u odnosu na jakost struje mala, (2-5)V/100A. Ovakva karakteristika omogućuje automatsku regulaciju električnog luka. Ukoliko se električni luk skрати ili produlji, karakteristika električnog luka siječe karakteristiku izvora struje u drugoj točki čime se relativno značajno mijenja jakost struje, a time i generirana toplina (slika 14). Rezultat je brže ili sporije taljenje žice i, u kombinaciji sa konstantnom brzinom dobave iste, održavanje konstantne duljine električnog luka.

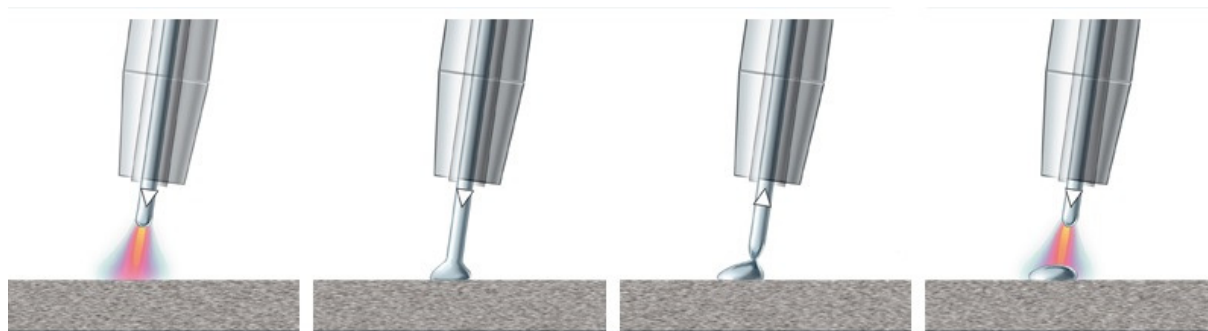


Slika 14. CV karakteristika izvora struje [12]

Dinamička karakteristika izvora struje je važan stavak u kontroli GMAW i FCAW postupaka zavarivanja. Razvojem invertorske tehnologije postalo je moguće fino regulacija dinamičke karakteristike, posebno njezinog induktiviteta. Ovime se postiže precizna kontrola unosa topline i prijenosa dodatnog materijala što je od velike važnosti kod zavarivanja OČVT-a. [13]

3.5.4.2. Kontrolirano pomicanje žice

Postupak se može kontrolirati i pomoću kontroliranog pomicanja žice. Tvrtka Fronius razvila je takav postupak zvan CMT (Cold Metal Transfer) (slika 15), koji nema prskanja i ima vrlo nizak unos topline. [13]



Slika 15. CMT postupak [14]

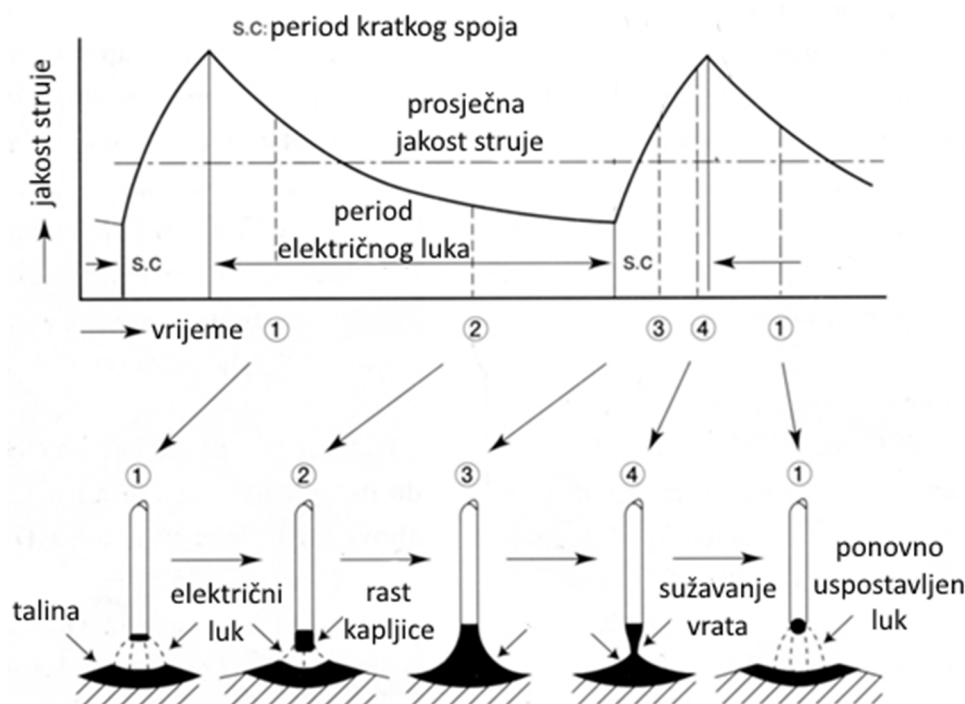
3.5.5. Prijenos metala

Stabilnost električnog luka istosmjerne struje pri zavarivanju taljivom elektrodom uvelike ovisi o tome kako se metal prenosi od elektrode do radnog komada. Postoje tri glavna načina prijenosa metala: kratkim spojevima i štrcajućim lukom i prijelaznim lukom. [13]

3.5.5.1. Prijenos kratkim spojevima

Zavarivanje kratkim spojevima obično se koristi pri nižim jakostima struja u svim položajima. Unos topline u osnovni materijal je nizak naspram drugih načina prijenosa, što čini ovaj postupak prikladnim za zavarivanje tankih materijala. [13]

Tijek postupka prikazan je na slici 16.



Slika 16. Prijenos metala kratkim spojevima [15]

Pri niskim strujama magnetske sile su niske i usmjerene prema gore. Kapljica koja visi na vrhu elektrode ima tendenciju povećanja i zbog toga postupak nekada može biti nestabilan. Način na koji se eliminira ovaj problem je držanje luka toliko kratkim da kapljice dotaknu talinu zavara prije nego previše narastu. Površinska napetost tada preuzima kapljicu i sjedinjuje je s ostatkom taline uz pomoć „pinch“ efekta.

Nikakva količina materijala se ne prenosi slobodnim kapljicama koje lete kroz prostor električnog luka.

Frekvencije kratkih spojeva su (50-200) Hz. Stabilnost prijenosa materijala je vrlo osjetljiva na promjene zaštitnog plina, kemijskog sastava elektrode i izvora struje i sustava dobave žice. Ukoliko je struja prejaka, do izražaja dolaze sile pinch efekta koje tada prouzrokuju prskanje.

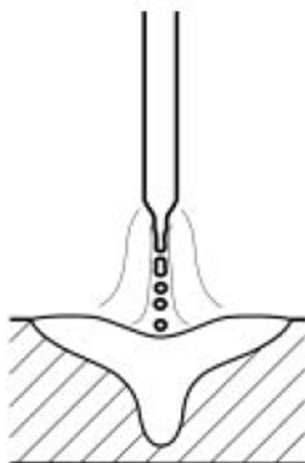
Nije uvijek jednostavno u potpunosti optimizirati stabilnost električnog luka pri ovom prijenosu materijala. Jednostavan način prosuđivanja postupka je pomoću zvuka koji stvara električni luk, a cilj je postići ujednačenu i visoku frekvenciju koja rezultira malenim kapljicama koje se prenose na radni komad dok su kapljice koje prskaju sa strane toliko malene da ne prijanjaju na površinu. [13]

3.5.5.2. Prijenos prijelaznim lukom

Pri strujama manjima od potrebnih za ostvarivanje štrcajućeg luka i naponima višim od onih za prijenos materijala kratkim spojem, postoji područje za koje su karakteristične kapljice veće od promjera dodatnog materijala i često nepravilnog oblika. Rastaljena kapljica raste dok se ne odvoji uslijed kratkog spoja ili pod djelovanjem sile gravitacije. Ovaj način prijenosa se najčešće izbjegava.

3.5.5.3. Prijenos štrcajućim lukom

Štrcajući luk se može koristiti samo pri velikim strujama i naponima. Stabilnost luka je dobra, a prijenos metala se odvija malenim kapljicama usmjerenog gibanja, slika 17. Unos topline i depozit je velik što ograničava na zavarivanje samo vodoravnih položaja i debljine materijala veće od 5 mm.



Slika 17. Prijenos metala štrcajućim lukom [13]

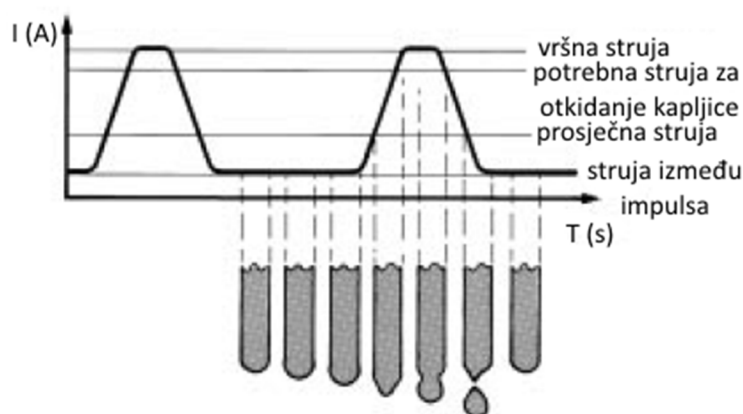
Struja kojom se postiže štrcajući luk omogućuje kapljici savladavanje sila površinske napetosti i njeno odvajanje od vrha elektrode. Pošto ne postoje kratki spojevi, luk je stabilan i ne uzrokuje prskanje. Treba naglasiti kako je za štrcajući luk potrebna zaštitna atmosfera čistog Ar, Ar s dodatkom CO_2 (do 25%) ili svega nekoliko postotaka O_2 . Tanjim elektrodama je moguće postići zavarivanje štrcajućim lukom i s manjim strujama.

3.5.5.4. Prijenos impulsnim zavarivanjem

Unaprjeđenja izvora struje posljednjih desetljeća su omogućila bolju dinamičku kontrolu struje zavarivanja. Ovo je omogućilo korištenje pulsnog prijenosa materijala tijekom zavarivačkog postupka. Struja se periodički mijenja između velike i male te time dopušta prijenos metala

tijekom pulsa velike struje, no sa sveukupno manjim unosom topline od štrcajućeg luka. Mikroprocesor kontrolnog sustava proračunava parametre pulsa potrebne za zadani promjer elektrode, tip materijala i zaštitni plin te frekvenciju potrebnu kako bi se električni luk održao konstantnim.

Puls izvora struje otkida kapljicu s vrha elektrode istom brzinom kojom se i dodaje. Tako se izbjegavaju kratki spojevi i stvaranje prskanja. Iako je prijenos metala kratkim spojevima najpogodniji za zavarivanje tankih limova, impulsno zavarivanje je najčešće najbolji izbor za Al i nehrđajuće čelike.



Slika 18. Prijenos metala impulsima [13]

Pulsevima se postiže dva glavna efekta: dovođenje topline kako bi se rastalio dodatni materijal i istovremeno „pinch off“ silu kako bi se otkinula samo jedna kapljica svaki puls (slika 18). To znači da ukoliko se brzina dodavanja žice povećava potrebno je povećati i broj impulsa. Niska struja između pulseva održava električni luk u tim periodima. Iako je amplituda pulseva visoka, prosječna struja je niska, što rezultira i niskom unesenom topline u zavareni spoj. Unešena energija je niža nego kod štrcajućeg luka, a viša nego kod prijenosa metala kratkim spojevima. Ovaj način prijenosa materijala je zanimljiv za zavarivanje OČVT-a zbog velike kontrole unosa topline.

4. OTPORNOST NA PROBOJNOST ZAVARA OKLOPNIH ČELIKA VELIKE TVRDOĆE

U ovom poglavlju opisana su načela mehanike proboja. Obuhvaćene su dvije osnovne vrste penetratora, mehanizmi proboja oklopa i efekti uslijed udara penetratora o oklop te mehanika proboja kinetičkim penetratorom.

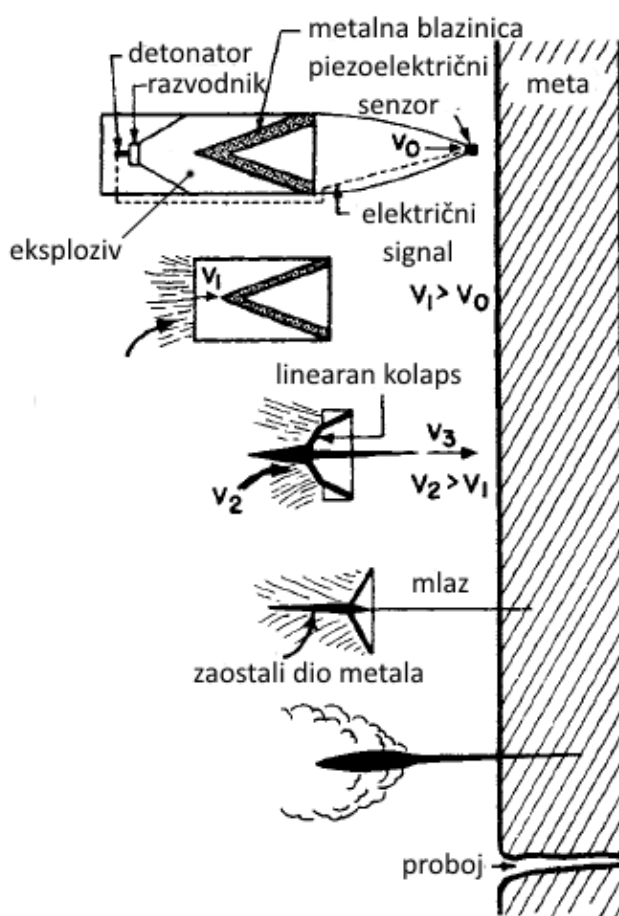
4.1. Mehanika proboja

Proboj se ostvaruje pomoću penetratora. Penetratori su naprave koje služe za probijanje određene prepreke, to jest oklopa. Klasificiraju se prema energiji koju koriste za probijanje, kinetičkoj i kemijskoj energiji.

4.1.1. Penetratori kemijskom energijom

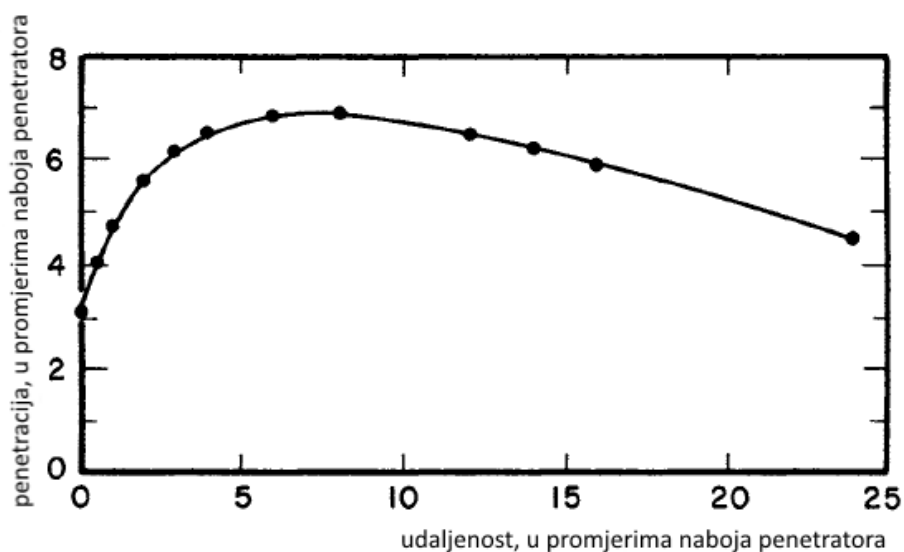
Energija za proboj dobiva se detonacijom eksploziva (kemijska energija pohranjena u materijalu eksploziva glavni je izvor energije kojom se vrši proboj) kada se sustav približi ili je u direktnom kontaktu s metom. Najefektivniji tip korištenja ovih penetratora je pomoću oblikovanog eksploziva, zvan HEAT (High Explosive Anti Tank).

Oblikovanje eksploziva izvodi se pomoću šupljine obložene metalnom blazinicom (slika 19.). Slika 19. prikazuje i redoslijed događaja: Projektil prilazi meti brzinom (v_0) i pokreće reakciju uređaja detonacijom eksploziva. Ona ubrzava metal koji konvergira u sredinu tvoreći mlaz koji putuje brzinama (v_3). Te brzine su veće nego brzine same eksplozije (v_1 i v_2) dok se deflektirani dio (zaostali dio metala) najsporije kreće u suprotnom smjeru ($v_3 > v_2 > v_1 > v_0$). Granica između jednog smjera gibanja i drugog smjera gibanja metala naziva se točka stagnacije. [19]



Slika 19. Redoslijed događaja pri probodu oblikovanim eksplozivom

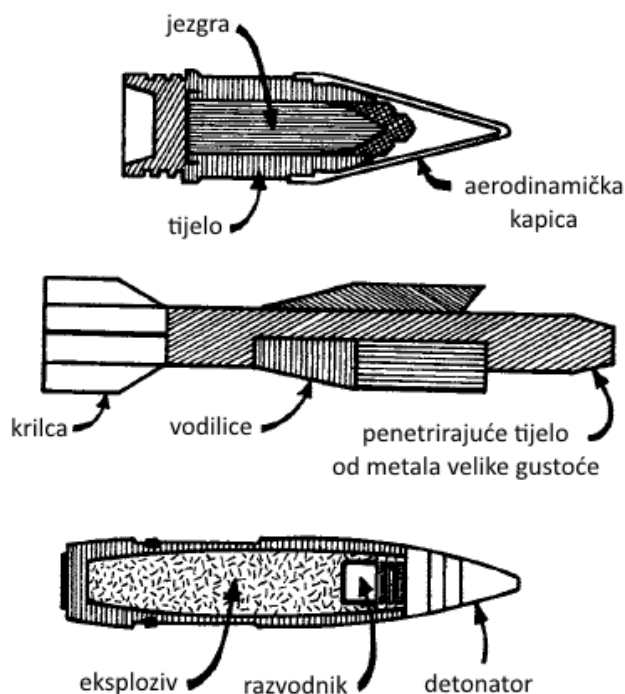
Efektivnost značajno ovisi o udaljenosti od probijenog komada, koja se mjeri od konično/zvonasto oblikovanog dijela eksploziva do mete u trenutku detonacije. Ukoliko je udaljenost prevelika, mlaz se rasprši i nema potrebnu fokusiranost za probod; kada je udaljenost premala mlaz nema vremena pravilno se formirati, slika 20. Fokusiranost mlaza ovisi o materijalu od kojeg je izrađena zvonasta čahura. [19]



Slika 20. Krivulja proboja mlaza kroz valjani homogeni oklop (eng. RHA, Rolled Homogenous Armor) [19]

4.1.2. Penetratori kinetičkom energijom

Kinetička energija koju ovi penetratori koriste za proboj dobiva se sagorijevanjem eksplozivnog punjenja u ograničenom prostoru (topovskoj cijevi). Na taj se način stvaraju plinovi koji posljedično stvaraju vrlo velike tlakove čijim se širenjem predaje energija projektilu.



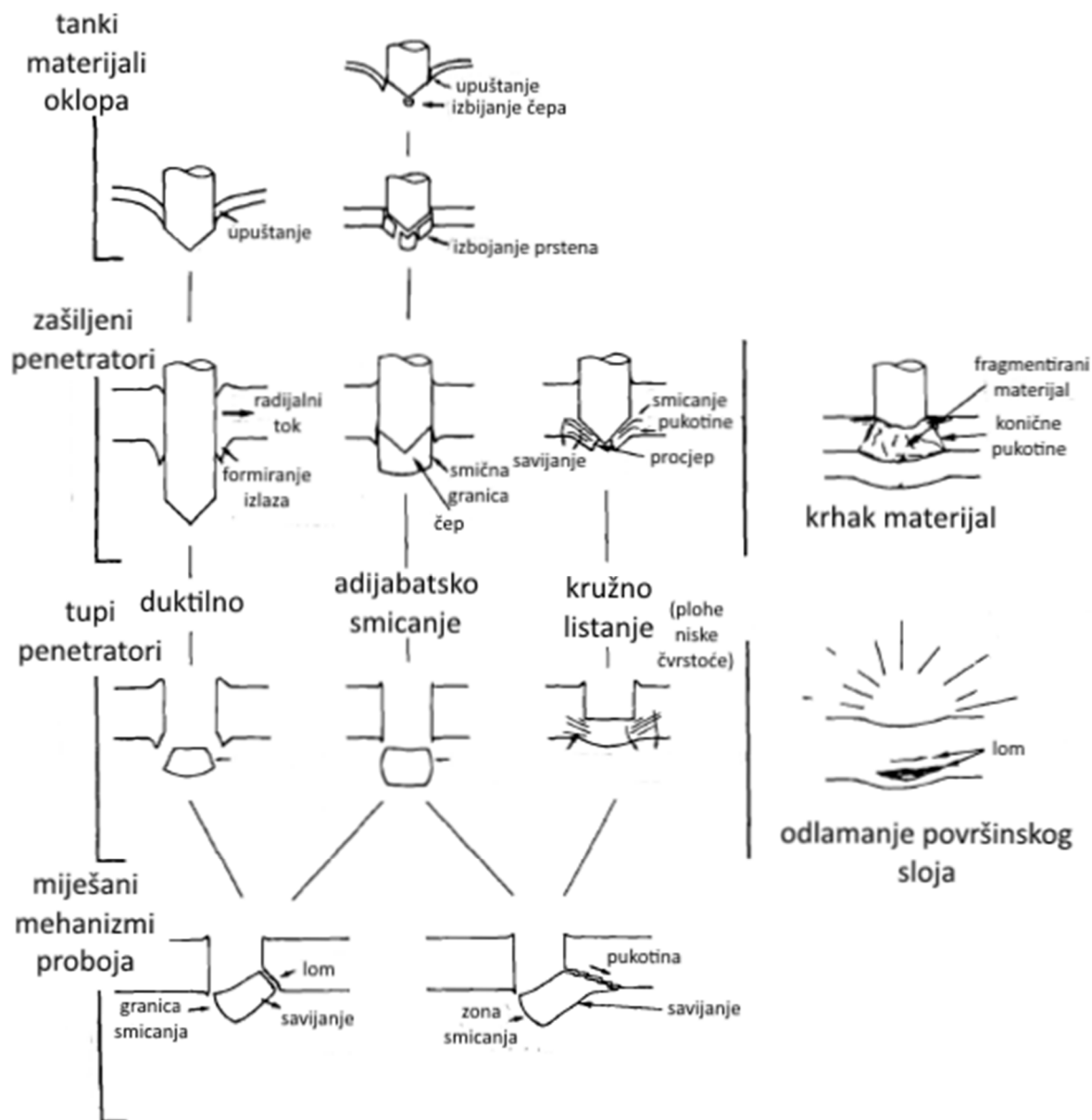
Slika 21. Tipovi kinetičkih penetratora [19]

Slika 21. prikazuje uobičajene izvedbe, prvi standardni 12,7 mm olovni metak presvučen čelikom. Drugi je dugačak cilindar (omjer duljine i promjera je 10:1) napravljen od legure velike gustoće na bazi volframa ili urana ispaljivan iz neožljebljene cijevi. Stabilnost leta osigurava se pomoću krilaca dok vodilice služe za vođenje tijekom prolaska kroz cijev. Treći je protuoklopni eksplozivni projektil čije se eksplozivno punjenje aktivira nakon proboja.

4.1.3. Mehanizmi proboja oklopa

Mehanizmi koji se javljaju pri probou oklopa ovise o mnogim faktorima. Jedan od najvažnijih je brzina projektila. Kako je poznato, kinetička energija je proporcionalna s kvadratom brzine. Kako se brzina kojom projektil udara o oklop povećava, područje na koju se nanosi šteta se smanjuje, oštećenje prelazi iz strukturnog u lokalno.

Prouzrokovana naprezanja i deformacije putuju kroz materijal nadzvučnim brzinama. Stoga, kvazi-statičke sile koje djeluju stvaraju stanje ravnoteže. Vanjskim opterećenjima se suprotstavljaju unutarnja naprezanja kroz tijelo. Kod udara velikom brzinom, vanjske sile mogu lokalno doseći svoj maksimum i raspršiti se prije nego cijelo tijelo osjeti prouzrokovana naprezanja. To je razlog zašto se stvara perforacija a ne plastična deformacija većeg dijela konstrukcije. Klasifikacija proboja oklopa na slici 22. prikazuje mehanizme koji se događaju uslijed proboja.



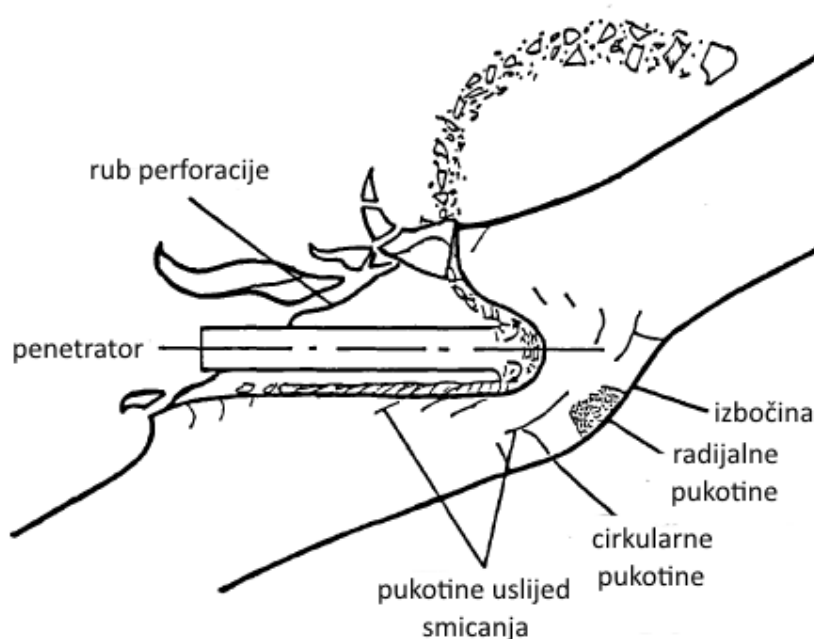
Slika 22. Mehanizmi proboja oklopa [20]

4.1.4. Proboj kinetičkim penetratorom

Kako je prije rečeno, kinetički projektil koristi kinetičku energiju vlastitog gibanja za proboj u neku zapreku, tj. oklop, a možda i kroz nju. Rezultat ovog djelovanja je ukopavanje projektila unutar zapreke ukoliko ne dođe do potpunog proboja, ili kod potpunog proboja, prolazak projektila kroz zapreku. Ukoliko se projektil odbije ili promijeni putanju tijekom proboja i izađe na drugom (vanjskom) mjestu zapreke, dolazi do pojave koju zovemo rikoše (4.1.4.2.). Nasuprot ovome je proboj, potpuna perforacija zapreke. Ovi procesi događaju se u intervalima

manjima od jedne milisekunde pri vrlo velikim brzinama što uzrokuje velika oštećenja projektila i mete.

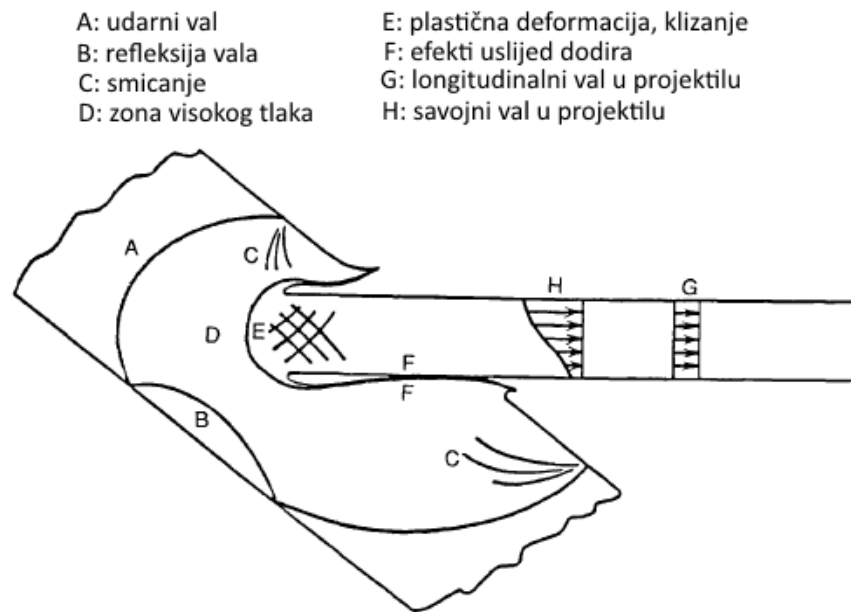
Oblik kinetičkog penetratora je zapravo štap s mogućim koničnim skošenjem na vrhu.



Slika 23. Proboj kinetičkom energijom [20]

Pri udaru, generiraju se tlačni udarni valovi naprezanja u projektilu i zapreci. Dije se na udarce ispod brzina širenja zvuka u dotičnom materijalu i udarce iznad njih. Pri brzinama ispod navedene granice, valovi se šire brzinom kojom se širi zvuk u njemu, dok pri većim brzinama longitudinalni valovi poprimaju brzine veće od brzine zvuka širenja u materijala uz što su u oba slučaja popraćeni i sporijim transverzalnim valovima. Pri dovoljno velikoj brzini udara o prepreku u projektilu se stvaraju valovi koji će propagirati prema lateralnoj površini, tvoreći tako dvodimenzionalno stanje naprezanja uslijed tlačne fronte uslijed djelovanja udarnih valova. Ovo vrijedi za okomit udar o prepreku, tj. oklopom. Ukoliko se oklop postavi sa skošenjem, javljaju se trodimenzionalna naprezanja zbog asimetričnosti te time i savojni valovi. U oklopu će se dvije vrste propagirajućih valova nastaviti širiti sve dok ne dođu do površine materijala (slika 24.). Tamo će, kako bi zadovoljili uvjete slobodne površine, tlačni pulsevi biti reflektirani kao vlačni te ukoliko njihova i amplituda i trajanje budu dovoljno veliki, doći će do kolidiranja materijala mehanizmima kako je prikazano na slici 22. Ovisno o materijalu,

geometriji i uvjetima kolizije, projektil može biti: deflektiran sa originalne putanje, otkinutog nosa, slomljen, erodiran ili savijen. [20]



Slika 24. Utjecaj udarnih valova pri kinetičkom proboju [20]

4.1.4.1. Proračun proboja

U 19. stoljeću francuska vojska u Metzu je među prvima vršila sistematske eksperimente iz kojih je proizašao izraz za probojnost oklopa topovskom kuglom:

$$mv^2 = Cd^\beta t^\alpha, \quad (3)$$

gdje je $\frac{1}{2}mv^2$ kinetička energija projektila, t maksimalna debljina oklopa, d promjer projektila, a faktori C , β i α empirijski dobivene vrijednosti.

To je bio jedan od prvih pokušaja za korištenjem znanosti na ovom području. Suvremeniji i kompleksniji matematički opis dao je Bruchey [21]:

$$\frac{\rho_p v^2}{E_p} \frac{L}{D} = C \left(\frac{t\theta}{d} \right)^\alpha \frac{E_p^\beta}{E_t} \left(\frac{\rho_p}{\rho_t} \right)^\gamma \quad (4)$$

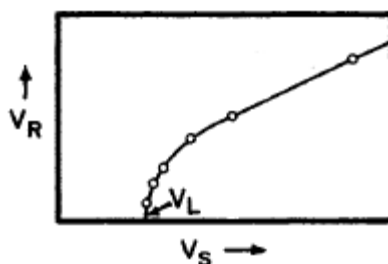
gdje indeks p označava projektil a indeks t metu; L_0 je duljina projektila a d promjer projektila; ρ označava gustoću; t debljinu oklopa; θ je kut pod kojim se projektil udara o oklop; α , β , γ i

C su empirijski dobivene vrijednosti. Kada se dobiju eksperimentalni parametri, moguće je odrediti krivulje proboja iz kojih se lako iščita balistički limit.

Balistički limit je granična brzina pri kojoj projektil probija oklop. Postoje razne definicije proboja oklopa kao što su: oklop mora biti probijen tako da svjetlo može proći kroz njega; ploča iza oklopa mora biti izbušena šrapnelima; polovica ili više projektila mora proći kroz oklop. Dvije metode su prikazane na slikama 25. i 26.



Slika 25. Statistička metoda određivanja balističkog limita [19]



Slika 26. Metoda rezidualne brzine [19]

4.1.4.2. Rikoše

Kada se govori o proboju kinetičkim penetratorom, treba spomenuti efekt koji se naziva rikoše. Taj efekt je odbijanje projektila od oklopa pod nekim kutem uz njegovo mijenjanje smjera pri kojem se oba materijala više ili manje oštećuju.

Kritični kut odbijanja opisao je relativno precizno Tate [22]:

$$\tan^3 \beta > \frac{2}{3} \cdot \frac{\rho_p \cdot V^2}{Y_p} \cdot \frac{L^2 + D^2}{L \cdot D} \cdot \left[1 + \left(\frac{\rho_t}{\rho_p} \right)^{1/2} \right] \quad (5)$$

Za udare pri kutu većem od kritičnog, a ispod tečenja materijala, penetrator će se najvjerojatnije odbiti bez oštećenja, uz izduljivanje. Erozijska oklopa je tada minimalna. Za brzine udara iznad granice tečenja materijala, penetrator se fragmentira a oštećenje oklopa je znatno.

Iz dugotrajnih ispitivanja i promatranja ponašanja rikošea, došlo se do sljedećih zaključaka:

1. Odmah nakon kontakta prednji dio penetratora plastično se deformira te nastavlja klizati paralelno s plohom oklopa. Pregib koji se tako stvorio ostaje stacionaran u prostoru u mjestu početnog kontakta. Ostatak penetratora prolazi kroz tu točku isto se pregibajući u toj točki prostora.
2. Nakon određenog prijeđenog puta uz oklop, prednji dio penetratora se odvaja od površine uslijed normalne sile inercije. Duljina između kontaktne točke i točke odvajanja ovisi o brzini udara i nagibu oklopa.
3. Za inicijalnu brzinu udara ispod granice tečenja materijala, svaki element penetratora dolazi u dodir s oklopom na istoj površini. Duljina i oblik oštećenja oklopa ovise o obliku vrha penetratora dok je prolazak ostalog dijela tijela penetratora od malog utjecaja. Za udare iznad granice tečenja, cijelo tijelo penetratora iznad njegovog vrha se ukopava u oklop i gura njegov materijal ispred sebe, rezultat čega je kontinuirano produbljivanje kratera.
4. Projektili koji se odbiju sa sobom nose malo do ništa erodiranog materijala oklopa. Projektili koji se fragmentiraju i uđu u oklop, pri izlasku sa sobom nose svoje fragmente kao i fragmente oklopa.
5. Pri rikošeu, ukoliko projektil nije uništen, oblik projektila postaje konkavan.
6. Pri udaru vrh penetratora jako brzo izgubi na brzini koju ponovo dobiva pri odvajanju od oklopa. Ovaj efekt uzrokuje vlačna naprezanja unutar tijela penetratora, a posljedično i njegovo izduženje, dok iznad granice tečenja materijala vlačna naprezanja uzrokuju raspadanje penetratora. [22]

4.1.4.3. Podjela procesa proboja

Fenomeni koji se događaju uslijed udara projektila o oklop mogu se karakterizirati na nekoliko načina: prema kutu udara, karakteristikama materijala i geometrije oklopa i projektila, brzini udara, čvrstoći, različitim fenomenima te kombinacijom ovih faktora.

Model prema kojem se dijeli proces proboja sastoji se od 4 faze (slika 27).

1. Faza inicijalnog udara

Odmah nakon kontakta stvara se tlak u dodirnoj točki uzrokujući jednodimenzionalno naprezanje jer udarni valovi u materijalu projektila i oklopa nisu imali vremena reagirati. Iz odnosa koji je dao Hugoniot, tlak je izražen kao:

$$p_H = \rho \cdot u_s \cdot u_p \quad (6)$$

gdje u_s predstavlja brzinu širenja udarnog vala, a u_p brzinu čestice, njenu promjenu brzine po fronti udarnog vala. Faza inicijalnog udara je izrazito kratka, za projekte s ravnim vrhom traje svega jednu nanosekundu. Za sferni vrh traje onoliko koliko je potrebno da proboj ne dostigne radijus sfere. Glavni faktori koji utječu na proboj su gustoća i stlačivost elemenata materijala oklopa i penetratora u blizini točke udara.

2. Faza stabilnog proboja

U ovoj fazi projektil troši svoju kinetičku energiju ponašajući se kao fluid tvoreći kanal u materijalu i pritom erodirajući. Tijekom ove faze, udarni valovi propagiraju od kontaktne površine u oboje, penetrator i oklop. U isto vrijeme, valovi koji su došli do ruba projektila pokreću lateralno tečenje oba materijala. Za vrlo male omjere duljine i promjera, L/D , ova faza može trajati izrazito kratko, pa čak i zanemarivo. Za veće vrijednosti ta faza je od vrlo velikog značaja za stvaranje dubokog kanala pri probou. U ovoj fazi do izražaja dolaze karakteristike kao što su gustoća penetratora i oklopa, brzina udara i geometrijska konfiguracija projektila.

Kako se proces odvija, inicijalan udarni val konstantno slabi, gubeći tako na brzini. Za udare male brzine inicijalni udarni val je toliko umanjen da se zanemaruje, dok za udare velikih brzina (nadzvučne s obzirom na materijal), brzina udarnog vala će se smanjivati sve dok ne dosegne granicu kretanja zvuka materijalom te tako postati ujednačen val iza kojeg će se odvijati ujednačeni procesi (neće biti šokova u materijalu). Tlak unutar deformiranog područja, fronte udarnog vala, unutar projektila varira no otprilike se može odrediti izrazom:

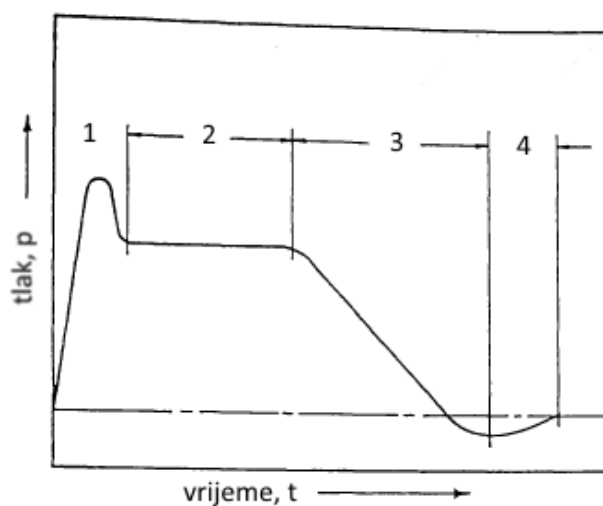
$$P > \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u_p^2 \quad (7)$$

3. Faza kavitacije

Nakon potpune erozije penetratora, krater se nastavlja širiti zbog energije zarobljene u materijalu oklopa. Ova faza traje dok gustoća energije udarnog vala ne dostigne dovoljno male veličine kojima više ne može deformirati materijal. U ovoj točki udarni val pretvara se u elastični ili plastični val koji putuje materijalom dok se ne rasprši.

4. Faza rekuperacije

U ovoj fazi materijal oklopa vraća se iz stanje elastične deformacije, rekristalizira ispod vidljivog dijela kratera. [20]



Slika 27. Faze udara velikih brzina [20]

5. ZAKLJUČNI OSVRT NA TEORETSKI DIO

Razviti oklop koji će izdržati određeni udar projektila o njega nije veliki izazov. No, oklop koji će izdržati zahtijevanu otpornost na proboj, a uz to pružiti traženu mobilnost oklopljenog objekta postaje vrlo složen zadatak. Tehnologije izrade, obrade i spajanja oklopa koji imaju ova dva zadovoljavajuća svojstva postoje, ali malo koja je isplativa i adaptabilna. Čelici obrađeni u ovom radu svojom velikom tvrdoćom zadovoljavaju osnovni zahtjev, veliku specifičnu otpornost na proboj.

Način dobivanja tih čelika nije lak. Veliko iskustvo i tehnološka obrazovanost pri dobivanju takvog materijala stvara rezultat koji je fascinant: iz široko dostupne sirovine, čelika, dobiva se oklopni materijal izrazito dobrih svojstava, što ga čini dostupnim za masovnu primjenu. Obradivost ovog čeličnog materijala klasičnim postupcima obrade odvajanjem čestica i deformiranja je dobra, što ga čini primjenjivim širokoj grupi proizvođača.

Primaran način spajanja OČVT-a je zavarivanje. Zbog kompleksnosti postupka dobivanja ovog čelika, sve toplinske utjecaje tijekom njegove obrade potrebno je strogo kontrolirati kako bi se održala njegova svojstva na prihvatljivoj razini. Unos topline prilikom zavarivanja stoga je kritičan parametar u postupku izgradnje konstrukcije od tog materijala. Prevelik unos topline vrlo lako može uništiti tvrdi i čvrstu strukturu ZUT-a čime se direktno ugrožava otpornost na probojnost konstrukcije. Drugi problem je unešeni vodik tijekom zavarivačkog postupka koji zbog krutosti materijala može prouzrokovati hladne pukotine. Redovito se iz ovog razloga koriste dodatni materijali koji svojim kemijskim sastavom rezultiraju austenitnom strukturom zavarenog materijala koja ima znatno veću otopivost vodika u svojoj rešetki. No takvim rješenjem sam zavareni spoj nema niti približno veliku tvrdoću kao osnovni materijal, što, ukoliko se koristi tehnologija na ovakvoj bazi, svaki zavareni spoj čini neotpornim na probojnost.

Na području terminalne balistike zavaara provode se razna istraživanja baš iz navedenih razloga. Glavna ideja je povećati tvrdoću po presjeku spoja uz zadovoljavajuća mehanička svojstva što se može postići kombinacijama dodatnih materijala.

6. UVOD EKSPERIMENTALNOG DIJELA

Cilj eksperimentalnog dijela je osmisliti plan pokusa kojim bi se zavarivanjem izradili uzorci pogodni za balistička ispitivanja. Pri tomu je nužno uzeti u obzir postojeće tehnologije i alternative koje bi polučile zadovoljavajuće rezultate.

Zavareni spojevi su izvedeni spajanjem limova osnovnog materijala odgovarajućih dimenzija. Korištene su tri vrste dodatnih materijala i tri postupka zavarivanja odgovarajućih parametara. Izvedena su 4 zavarena spoja s različitim dodatnim materijalima, različitih tvrdoća i različitih redosljeda slaganja, tablica 4. Za specifikacije postupaka zavarivanja vidjeti tehničku dokumentaciju u prilogu.

Tablica 4 Plan pokusa

	Uzorak U1	Uzorak U2	Uzorak U3	Uzorak U4
Osnovni materijal	ARMOX® 500T	ARMOX® 500T	ARMOX® 500T	ARMOX® 500T
Dodatni materijali	Lincoln Electric® MIG 309L Si	Lincoln Electric® MIG 309L Si i Castolin Eutectic® EnDOtec® DO*30	Lincoln Electric® MIG 309L Si i Durmat FD 739	Lincoln Electric® MIG 309L Si i Castolin Eutectic® EnDOtec® DO*30
Slaganje slojeva zavora	svi slojevi male tvrdoće	prvi sloj male, drugi sloj velike tvrdoće	prvi sloj male, drugi sloj velike, treći sloj male tvrdoće	prvi sloj male, drugi sloj male, treći sloj velike tvrdoće
Postupci zavarivanja	131	131, 136	131, 114	131, 136

6.1. Osnovni materijal

Korišteni osnovni materijal je ARMOX® 500T. Ovaj čelik spada u grupu oklopnih čelika velike tvrdoće, OČVT, čiji su kemijski sastav, mikrostruktura i svojstva obrađeni u poglavlju 2.

6.1.1. Priprema osnovnog materijala

Osnovni materijal je debljine 8 mm. Izrezivanje ploča dimenzija 300 x 350 mm izvedeno je plinskim rezanjem u struji tehnički čistog kisika. Skošenje za pripremu zavarenog spoja obrađeno je odvajanjem čestica glodanjem pod 45°, vidjeti prilog tehničke dokumentacije: „Ploča sa skošenjem, priprema za zavareni spoj“.

Obrada odvajanjem čestica korištena je za eliminaciju prethodno dobivenog ZUT-a uslijed plinskog rezanja i postizanja uniformnih dimenzija uzoraka.

Na taj način pripremljeno je ukupno 20 ploča označenih nasumično oznakama od P1 do P20.

6.2. Dodatni materijal

Za provedbu pokusa korištena su 3 dodatna materijala. Lincoln Electric® MIG 309L Si, Durmat® FD 739 i Castolin Eutectic® EnDOtec® DO*30.

6.2.1. Lincoln Electric® MIG 309L Si

Lincoln Electric® BLUE MAX® MIG 309L Si je dodatni materijal u obliku pune žice promjera 1,2 mm za koji je potrebna dodatna zaštitna atmosfera tokom zavarivanja. Metal zavara je austenitne strukture. Dostupna mehanička svojstva i kemijski sastav prikazani su u tablicama 5 i 6.

Tablica 5. Mehanička svojstva dodatnog materijala Lincoln Electric® MIG 309L Si

Granica elastičnosti, $R_{p0,2}$ [MPa]	450,0
Vlačna čvrstoća, R_m [MPa]	595,0
Produljenje, A_5 [%]	42,0
Feritni broj, FN	14,0

Tablica 6. Kemijski sastav dodatnog materijala Lincoln Electric® MIG 309L Si [23]

Element	Udio kemijskog elementa [%]	
	Zahtjev prema AWS ER309LSi	Ispitana vrijednost
C	0,03 max.	0,03
Cr	23,0 – 25,0	23,5
Ni	12,0 - 14,0	13,7
Mo	0,75 max.	0,28
Mn	01 - 2,5	2
Si	0,65 – 1,0	0,89
P	0,03 max.	0,02
S	0,03 max.	0,01
N	nije definirano	0,06
Cu	0,75 max.	0,22
Fe	ostatak	ostatak

6.2.2. Durmat® FD 739

Durmat® FD 739 je dodatni materijal za tvrdo navarivanje u obliku metalnim praškom punjene žice promjera 1,6 mm za koji nije potrebna dodatna zaštitna atmosfera tokom zavarivanja. Specifičnost ovog dodatnog materijala je fina precipitacija karbida. Dostupna mehanička svojstva i kemijski sastav prikazani su u tablicama 7 i 8.

Tablica 7. Mehanička svojstva Durmat® FD 739 [24]

Tvrdoća [HRC]	67-70
---------------	-------

Tablica 8. Kemijski sastav dodatnog materijala Durmat® FD 739 [24]

Element	Udio kemijskog elementa [%]
C	1,0
Cr	2,0
W	5,7
Mo	3,3
Nb	3,4
B	4,4
Fe	ostatak

6.2.3. Castolin Eutectic® EnDOtec® DO*30

Castolin Eutectic® EnDOtec® DO*30 je dodatni materijal za tvrdo navarivanje u obliku metalnim praškom punjene žice promjera 1.2 mm zaki je potrebna dodatna atmosfera tokom zavarivanja. Specifičnost ovog dodatnog materijala je sidrenje ultra tvrdih mikro konstituenata u eutektičkoj karbidnoj matrici od Fe, Ni i Co. Dostupna mehanička svojstva su prikazana u tablici 9. Kemijski sastav nije specificiran.

Tablica 9. Mehanička svojstva Castolin Eutectic® EnDOtec® DO*30 [25]

Tvrdoća [HRC]	~ 67
---------------	------

[25].

6.3. Tijek zavarivanja

Zavareni spoj je izveden tako da se na svih 20 ploča navario međusloj. Međusloj je zavaren kako bi se izbjegle hladne i tople pukotine, osigurala dovoljna prionjivost dodatnih materijala za tvrdo navarivanje te održala čvrstoća spoja. Potom su se parovi ploča spajali kako je prikazano u tablici 10. Svi parovi su imali identične međuslojne i korijenske prolaze. Zavarivanje je provedeno u laboratorijskim uvjetima.

Tablica 10. Raspored spojenih ploča

Par ploča	Uzorak
P1 + P2	U1-1
P7 + P8	U1-2
P9 + P10	U2-1
P17 + P18	U2-2
P3 + P4	U3-1
P5 + P6	U3-2
P11 + P12	U4-1
P15 + P16	U4-2
P13 + P14	proba - odbačeno
P19 + P20	proba - odbačeno

Nakon međuslojnih i korijenskih prolaza svaka vrsta spoja ostvarena je u dva uzorka.

Izračunavanje unesene topline provedeno je u skladu s HRN EN 1011-2:2009.

6.3.1. Međusloj

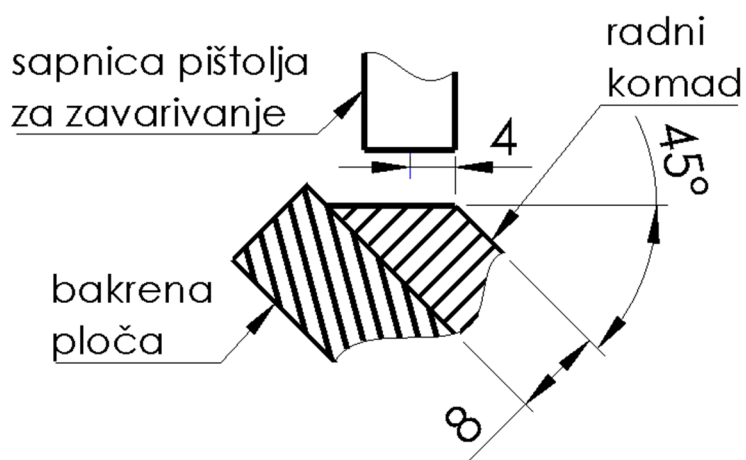
Prije zavarivanja je svaki skošeni rub, na kojemu će se zavarivati, očišćen žičanom četkom od nehrđajućeg čelika i odmašćen alkoholom.

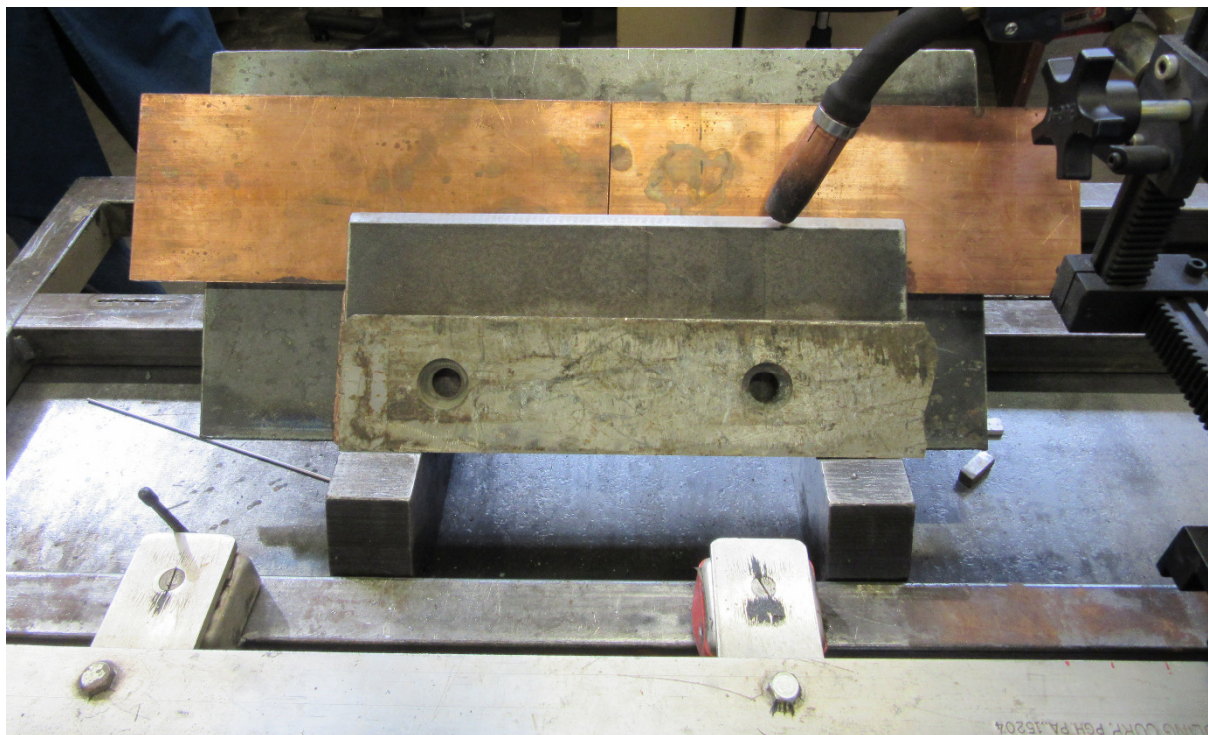
Nakon pripreme površine na skošene rubove ploča je navaren međusloj (eng. buttering layer) s parametrima danim u tablici 11.

Tablica 11. Parametri navarivanja prolaza međusloja

v_z [cm/min]	31,0
v_z [m/min]	4,0
I [A]	135,0 – 140,0
U [V]	23,8 – 24,0
Q [kJ]	0,83
polaritet	DC(+) pulse
tehnika rada	lijeva, bez njihanja
udaljenost sapnice i radnog komada [mm]	6,0
nagib zavarivačkog pištolja [°]	20,0
dodatni materijal	Lincoln Electric® MIG 309L Si

Navarivanje međusloja je izvedeno na bakrenim pločama. Sve ploče postavljene su pod kutom od 45° kako bi površina skošenja bila vodoravna, slika 28. Udaljenost elektrode od gornjeg ruba skošenja iznosi 4 mm.

**Slika 28. Položaj zavarivanja međusloja**



Slika 29 Konfiguracija zavarivanja međusloja



Slika 30 Konfiguracija zavarivanja međusloja, bočna strana

6.3.2. Korijenski prolaz

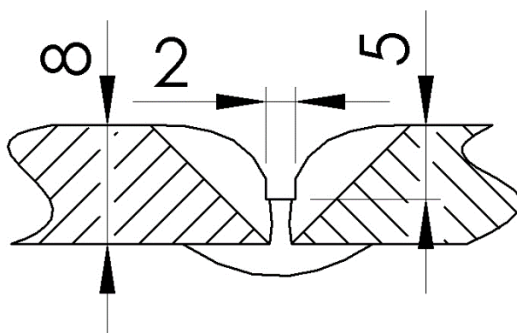
Prije zavarivanja svaki je međuslojni prolaz očišćen žičanom četkom od nehrđajućeg čelika zbog eventualnih grubih nečistoća i troske te odmašćen alkoholom.

Nakon pripremanja površine zavarivao se korijenski prolaz. Izveden je na način da su se uzorci okrenuli poledinom prema gore i doveli na određenu međusobnu udaljenost te je zavaren korijenski prolaz. Parametri zavarivanja korijenskog prolaza prikazani su u tablici 12.

Tablica 12. Parametri zavarivanja korijenskog prolaza

v_z [cm/min]	25,0
v_z [m/min]	4,0
I [A]	135 - 140
U [V]	23,7 - 24
Q [kJ]	1,03
polaritet	DC(+) pulse
tehnika rada	desna, bez njihanja
udaljenost sapnice i radnog komada [mm]	7,0
nagib zavarivačkog pištolja [°]	20,0
otvor žljeba [mm]	1,3 - 1,8
međuprolazna temperatura [°C]	< 100
dodatni materijal	Lincoln Electric® MIG 309L Si

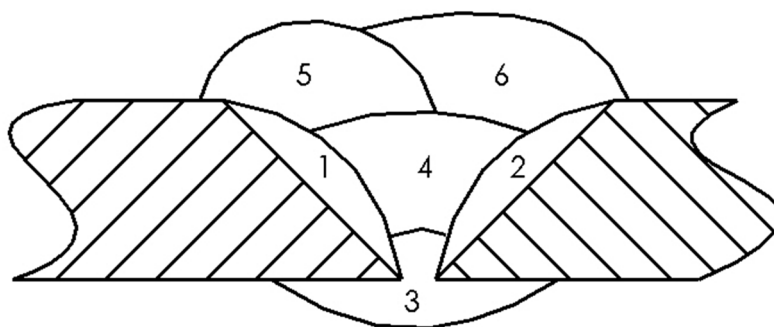
Nakon zavarivanja je svaki korijenski prolaz s prednje strane po sredini zarezan čistom abrazivnom pločom. Geometrija reza prikazana je na slici 31. Izbrušenje je učinjeno kako bi se odstranile eventualne zarobljene nečistoće i dobile uniformne dimenzije svih uzoraka.



Slika 31. Izbrušenje korijena

6.3.3. Uzorci U1-1 i U1-2

Prije zavarivanja svakog prolaza, površina prethodnog je očišćena žičanom četkom od nehrđajućeg čelika zbog eventualnih grubih nečistoća i troske te odmašćen alkoholom.



Slika 32. Redosljed zavarivanja uzoraka U1-1, U1-2, U3-1, U3-2, U4-1 i U4-2

Preostala 3 prolaza (4, 5 i 6), slika 32., zavarivani su Lincoln Electric® MIG 309L Si dodatnim materijalom. Parametri zavarivanja prolaza popune, broj 4 na slici 32., prikazani su u tablici 13.

Tablica 13. Parametri zavarivanja prolaza popune

v_z [cm/min]	25,0
v_z [m/min]	4,0
I [A]	135,0 – 140,0
U [V]	23,7 - 24
Q [kJ]	1,03
polaritet	DC(+) pulse
tehnika rada	lijeva, bez njihanja
udaljenost sapnice i radnog komada [mm]	7,0
nagib zavarivačkog pištolja [°]	20,0
međuprolazna temperatura [°C]	< 100
dodatni materijal	Lincoln Electric® MIG 309L Si

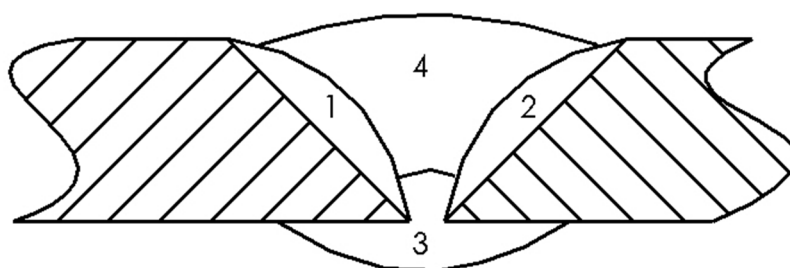
Parametri zavarivanja pokrovnih prolaza, broj 5 i 6 na slici 32., prikazani su u tablici 14.

Tablica 14. Parametri zavarivanja pokrovnih prolaza

v_z [cm/min]	35,5
v_z [m/min]	6,4
I [A]	185,0 – 190,0
U [V]	28,5 - 28,6
Q [kJ]	1,19
polaritet	DC(+) pulse
tehnika rada	desna, bez njihanja
udaljenost sapnice i radnog komada [mm]	7,0
nagib zavarivačkog pištolja [°]	20,0
međuprolazna temperatura [°C]	< 100
dodatni materijal	Lincoln Electric® MIG 309L Si

6.3.4. Uzorci U2-1 i U2-2

Prije zavarivanja završnog prolaza površina prethodnog je očišćena žičanom četkom od nehrđajućeg čelika zbog eventualnih grubih nečistoća i troske te odmašćena alkoholom.



Slika 33. Redoslijed zavarivanja uzoraka U2-1 i U2-2

Završni prolaz, broj 4 na slici 33., zavarivan je Castolin Eutectic® EnDOtec® DO*30 dodatnim materijalom. Parametri zavarivanja ovog prolaza prikazani su u tablici 15.

Tablica 15. Parametri zavarivanja završnog sloja uzoraka U2-1 i U2-2 i pokrovnog sloja U4-1 i U4-2

v_z [cm/min]	31,5
v_z [m/min]	7,3
I [A]	160 - 170
U [V]	28,4 - 29
Q [kJ]	1,15
polaritet	DC(+) pulse
tehnika rada	desna, bez njihanja
udaljenost sapnice i radnog komada [mm]	10,0
nagib zavarivačkog pištolja [°]	20,0
međuprolazna temperatura [°C]	< 100
dodatni materijal	Castolin Eutectic® EnDOtec® DO*30

6.3.5. Uzorci U3-1 i U3-2

Prije zavarivanja završnog prolaza površina prethodnog očišćena je žičanom četkom od nehrđajućeg čelika zbog eventualnih grubih nečistoća i troske te odmašćena alkoholom.

Oblik i raspored prolaza ovog zavarenog spoja prikazani su na slici 32.

Prolaz broj 4 zavaren je Durmat® FD 739 dodatnim materijalom. Parametri zavarivanja ovog prolaza prikazani su u tablici 16.

Tablica 16. Parametri zavarivanja sloja popune uzoraka U3-1 i U3-2

v_z [cm/min]	44,5
v_z [m/min]	9,1
I [A]	208 - 212
U [V]	21 - 21,3
Q [kJ]	0,78
polaritet	DC(+) pulse
tehnika rada	desna, bez njihanja
udaljenost sapnice i radnog komada [mm]	18,0
nagib zavarivačkog pištolja [°]	20,0
međuprolazna temperatura [°C]	< 100
dodatni materijal	Durmat® FD 739

Prolazi broj 5 i 6 zavarivani su Lincoln Electric® MIG 309L Si dodatnim materijalom. Parametri zavarivanja ovog prolaza prikazani su u tablici 13.

6.3.6. Uzorci U4-1 i U4-2

Prije zavarivanja završnog prolaza površina prethodnog očišćena je žičanom četkom od nehrđajućeg čelika zbog eventualnih grubih nečistoća i troske te odmašćen alkoholom.

Oblik i raspored prolaza ovog zavarenog spoja prikazani su na slici 32.

Prolaz broj 4 zavaren je Lincoln Electric® MIG 309L Si dodatnim materijalom. Parametri zavarivanja ovog prolaza prikazani su u tablici 13.

Prolazi broj 5 i 6 zavareni su Castolin Eutectic® EnDOtec® DO*30 dodatnim materijalom. Parametri zavarivanja prikazani su u tablici 15.

7. BALISTIČKA ISPITIVANJA

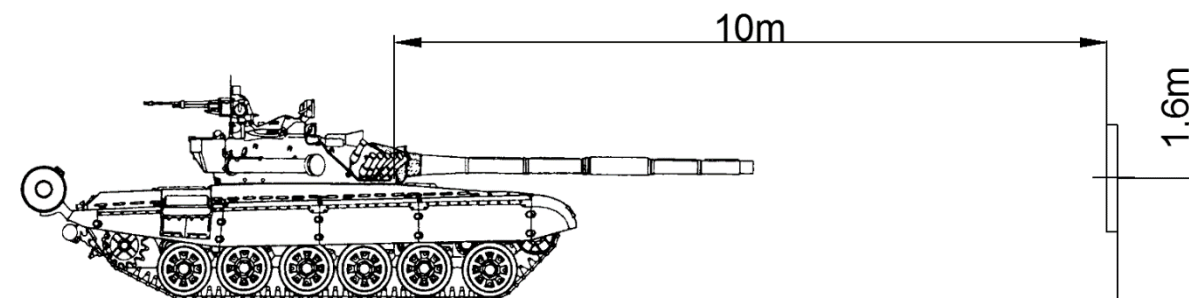
Osnovni materijal, ARMOX® 500T, debljine 8 mm dizajniran je da izdrži balistička opterećenja razine 2 prema normi NATO AEP-55 STANAG 4569. Stoga je kod balističkih ispitivanja korištena municija upravo te razine probojnosti, standardni 7,62x51 s bakrenom košuljicom. Oznake se mogu vidjeti na slici 34.



Slika 34. Čahura iskorištenog standardnog metka 7,62x51 s bakrenom košuljicom

Za balistička ispitivanja korišteni su uzorci U1-1, U2-1, U3-1 i U4-1.

Gađanje je provedeno tenkovskom strojnicom 7,62 mm, a ciljano je pomoću durbina. Vremenski uvjeti: $\approx 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ uz umjeren vjetar. Uvjeti gađanja prikazani su na slici 35.



Slika 35. Uvjeti gađanja

Probna meta i uzorci U1-1, U2-1, U3-1 i U4-1 postavljeni su u noseći okvir, slika 36.



Slika 36 Probna meta učvršćena u noseći okvir

Udaljenost cijevi strojnice i mete bila je ≈ 10 m s približno istom horizontalnom udaljenošću. Krutost i nepomičnost nosećeg okvira osigurani su kako bi se izbjegao gubitak energije uslijed pomicanja okvira. Za vrijeme gađanja tenk i noseći okvir nisu pomicali.

Prije ispitnog gađanja provedeno je gađanje u probnu metu u svrhu verifikacije točnosti gađanja.

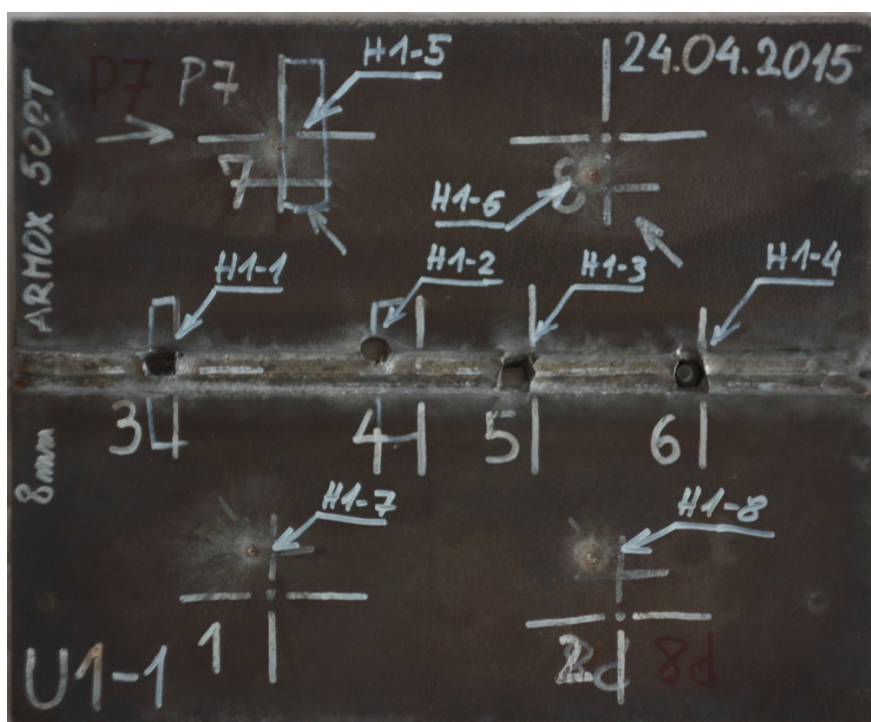
U svaki ispitni uzorak ispalilo se po 4 hica u zavar. U U1-1 gađano je s dodatna 4 hica u osnovni materijal. U U2-1 gađano je s dodatna 4 hica municijom kalibra 12,7 mm. U U3-1 gađano je s 4 dodatna hica sa po dva u isto mjesto. Opisani tijek gađanja može se vidjeti na slikama 39., 53., 69. i 83.

Rasipanje pogodaka od točke nišanja bilo je u rasponu od ± 3 cm.

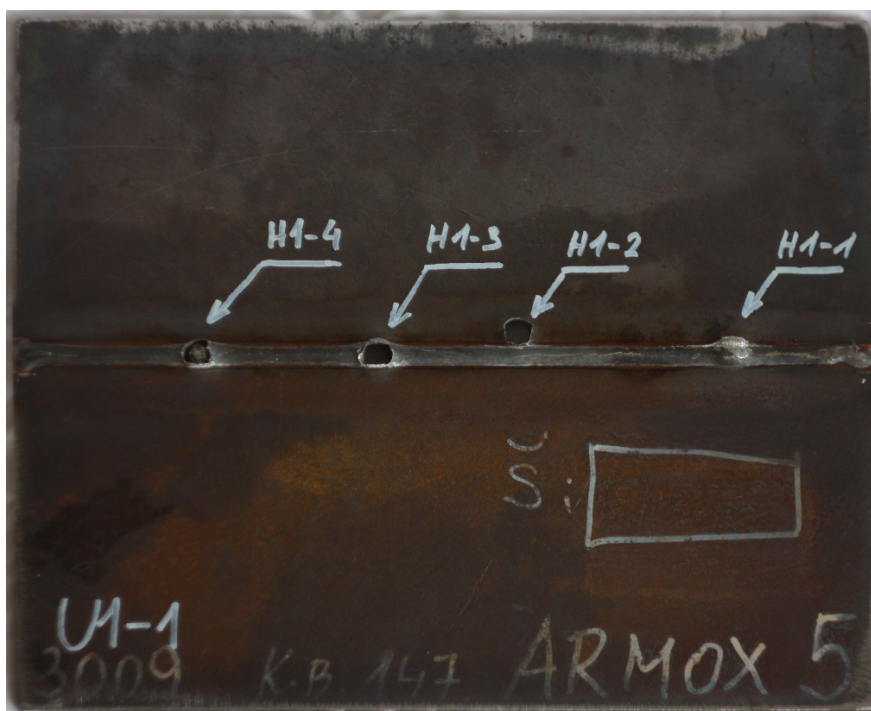
Detaljnije slike svih pogodaka dane su u prilogu rada.

7.1. Uzorak U1-1

Zavareni spoj ispitnog uzorka U1-1 nije izdržao balistička opterećenja kojima je izložen. Hici su potpuno ili parcijalno probili metal zavara, zonu staljivanja i ZUT-a, slike 37. i 38.



Slika 37. U1-1, prednja strana



Slika 38. U1-1, stražnja strana

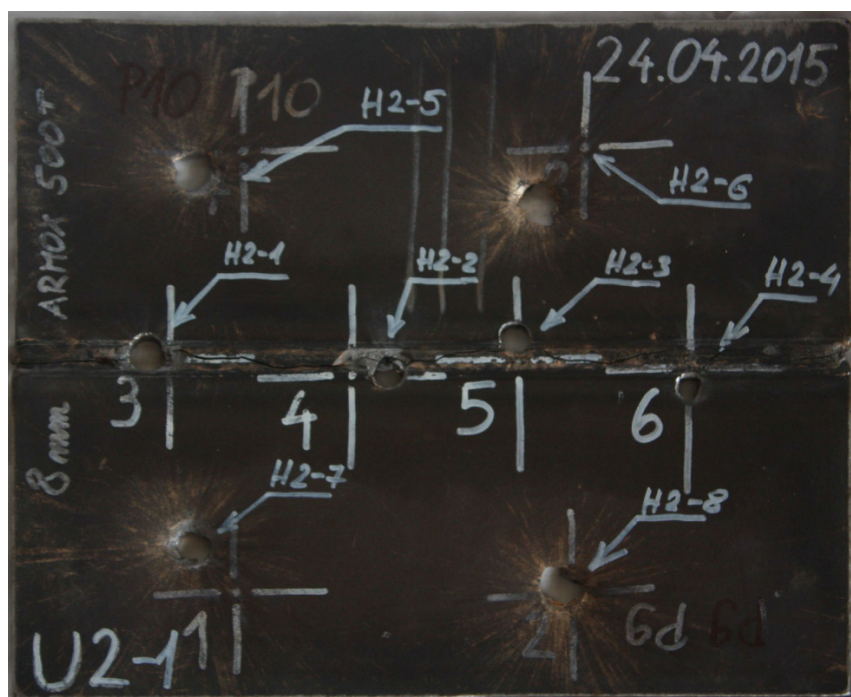
U tablici 17. navedena su mjesta pojedinog pogotka, stupanj oštećenja i tip proboja ukoliko je do njega došlo.

Tablica 17. Pogodci U1-1

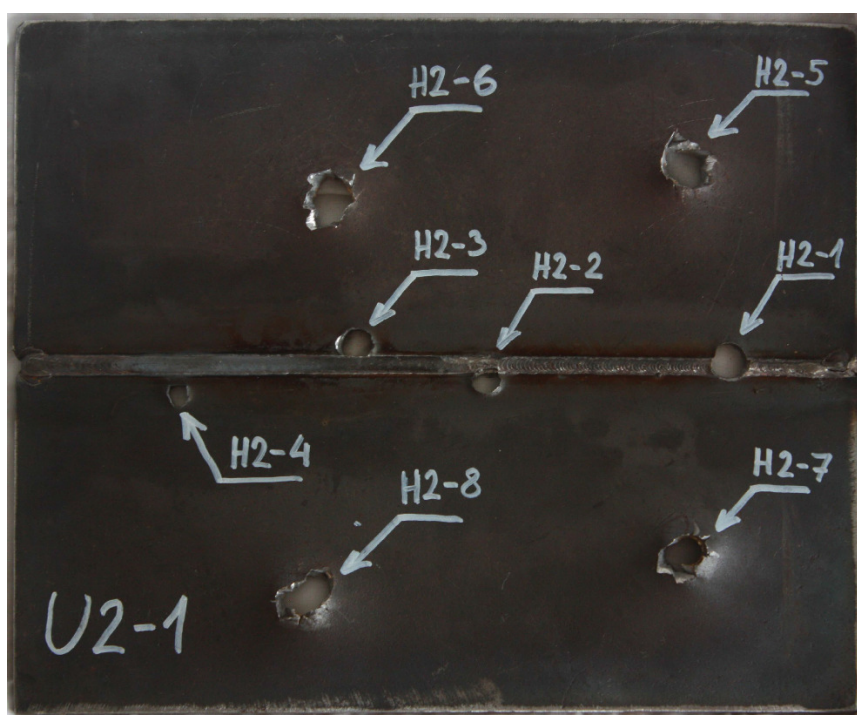
Pogodak	Mjesto pogotka	Stupanj oštećenja	Tip proboja
H1-1	metal zavara	parcijalni proboj	smicanje po zoni staljivanja
H1-2	zona staljivanja i ZUT	potpuni proboj	plugging
H1-3	metal zavara	potpuni proboj	plugging
H1-4	metal zavara	potpuni proboj	plugging, zrno metka ostalo zarobljeno u perforaciji
H1-5	osnovni materijal	bez značajnih oštećenja	-
H1-6	osnovni materijal	bez značajnih oštećenja	-
H1-7	osnovni materijal	bez značajnih oštećenja	-
H1-8	osnovni materijal	bez značajnih oštećenja	-

7.2. Uzorak U2-1

Zavareni spoj ispitnog uzorka U2-1 nije izdržao balistička opterećenja kojima je izložen. Hici su potpuno probili metal zavara, zonu staljivanja i ZUT-a, slike 39. i 40.



Slika 39. U2-1, prednja strana



Slika 40. U2-1, stražnja strana

U tablici 18. navedeno je mjesto pojedinog pogotka, stupanj oštećenja i tip proboja ukoliko je do njega došlo.

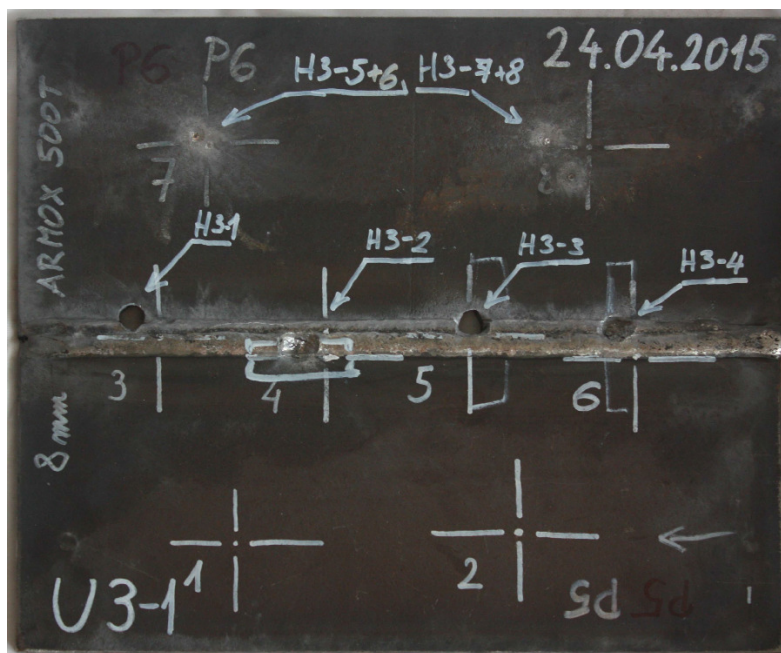
Tablica 18. Pogodci U2-1

Pogodak	Mjesto pogotka	Stupanj oštećenja	Tip proboja
<i>H2-1</i>	metal zavara	potpuni proboj	plugging
H2-2	zona staljivanja	potpuni proboj	plugging
H2-3	zona staljivanja	potpuni proboj	plugging
H2-4	ZUT	potpuni proboj	plugging
H2-5	osnovni materijal	potpuni proboj	savijanje, pukotine, plugging
H2-6	osnovni materijal	potpuni proboj	savijanje, pukotine, plugging
H2-7	osnovni materijal	potpuni proboj	savijanje, pukotine, plugging
H2-8	osnovni materijal	potpuni proboj	savijanje, pukotine, plugging

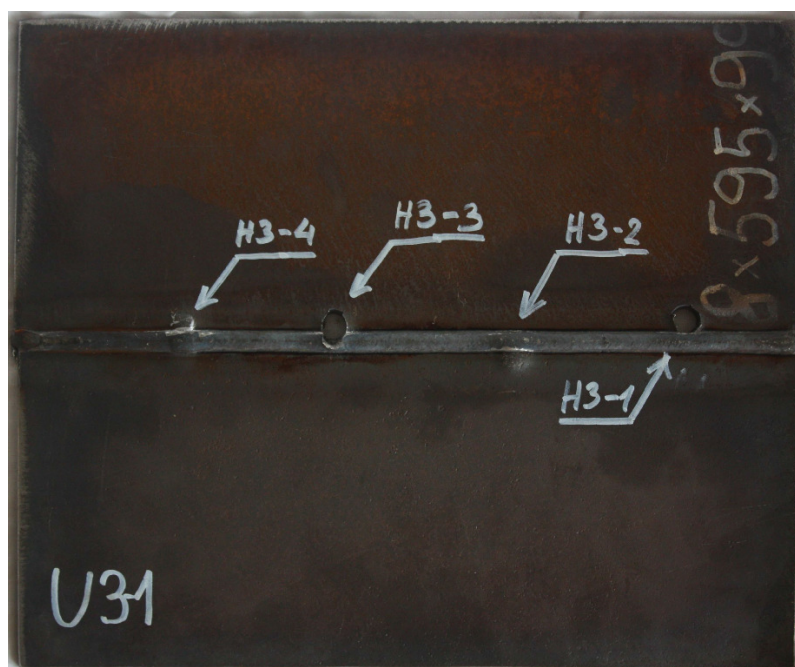
Pukotine koje su se javile u zavarenom spoju paralelno s njime nastale su uslijed proboja H2-5, H2-6, H2-7 i H2-8 municijom kalibra 12,7 mm.

7.3. Uzorak U3-1

Zavareni spoj ispitnog uzorka U3-1 izdržao je balistička opterećenja kojima je izložen. Hici nisu probili metal zavara, ZUT i zona staljivanja su probijeni, slike 41. i 42.



Slika 41. U3-1, prednja strana



Slika 42. U3-1, stražnja strana

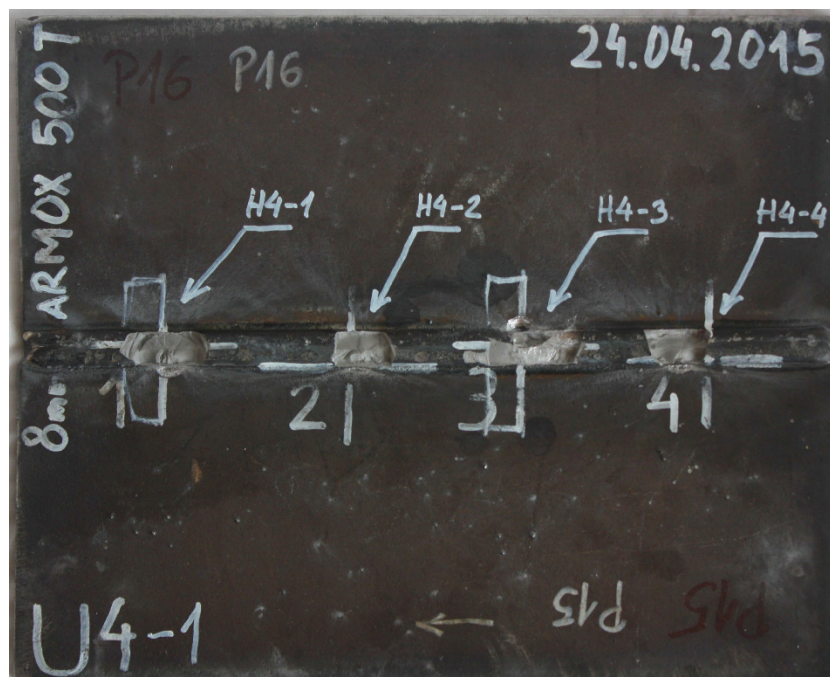
U tablici 19. navedeno je mjesto pojedinog pogotka, stupanj oštećenja i tip proboja ukoliko je do njega došlo.

Tablica 19. Pogodci U3-1

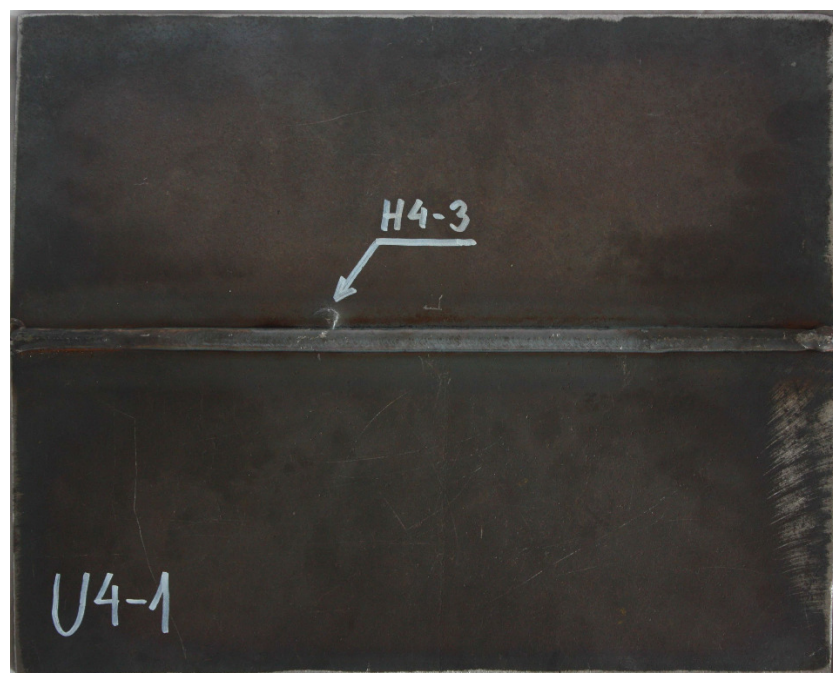
Pogodak	Mjesto pogotka	Stupanj oštećenja	Tip proboja
H3-1	ZUT	potpuni proboj	plugging
H3-2	metal zavara	udarni kreator, bez proboja, vidljivo oštećenje na stražnjoj strani	-
H3-3	zona staljivanja	potpuni proboj	plugging
H3-4	metal zavara	udarni kreator, bez proboja, vidljiva oštećenja na stražnjoj strani, vidljivo oštećenje na stražnjoj strani	-
H3-5+6	osnovni materijal	bez značajnih oštećenja	-
H3-7+8	osnovni materijal	bez značajnih oštećenja	-

7.4. Uzorak U4-1

Zavareni spoj ispitnog uzorka U4-1 izdržao je balistička opterećenja kojima je izložen. Hici nisu probili metal zavara i zonu staljivanja, ZUT je djelomično pogođen, slike 43. i 44.



Slika 43. U4-1, prednja strana



Slika 44. U4-1, stražnja strana

U tablici 20. navedeno je mjesto pojedinog pogotka, stupanj oštećenja i tip proboja ukoliko je do njega došlo.

Tablica 20. Pogodci U4-1

Pogodak	Mjesto pogotka	Stupanj oštećenja	Tip proboja
<i>H3-1</i>	metal zavara	pokrovni sloj zavara odlomljen, preostali dio zavara bez većih oštećenja	-
H3-2	metal zavara	pokrovni sloj zavara odlomljen, preostali dio zavara bez većih oštećenja	-
H3-3	metal zavara i ZUT	pokrovni sloj zavara odlomljen, preostali dio zavara bez većih oštećenja, ZUT parcijalno pogođen, vidljivo oštećenje na stražnjoj strani	-
H3-4	metal zavara	pokrovni sloj zavara odlomljen, preostali dio zavara bez većih oštećenja	-

Odlomljeni komadi ovog uzorka prikazani su na slikama 45., 46., 47. i 48. Na njima se jasno može vidjeti mjesto udara zrna, područje odlamanja uslijed djelovanja udarnog vala i područje trganja uslijed djelovanja sila uzrokovanih kinetičkom energijom.



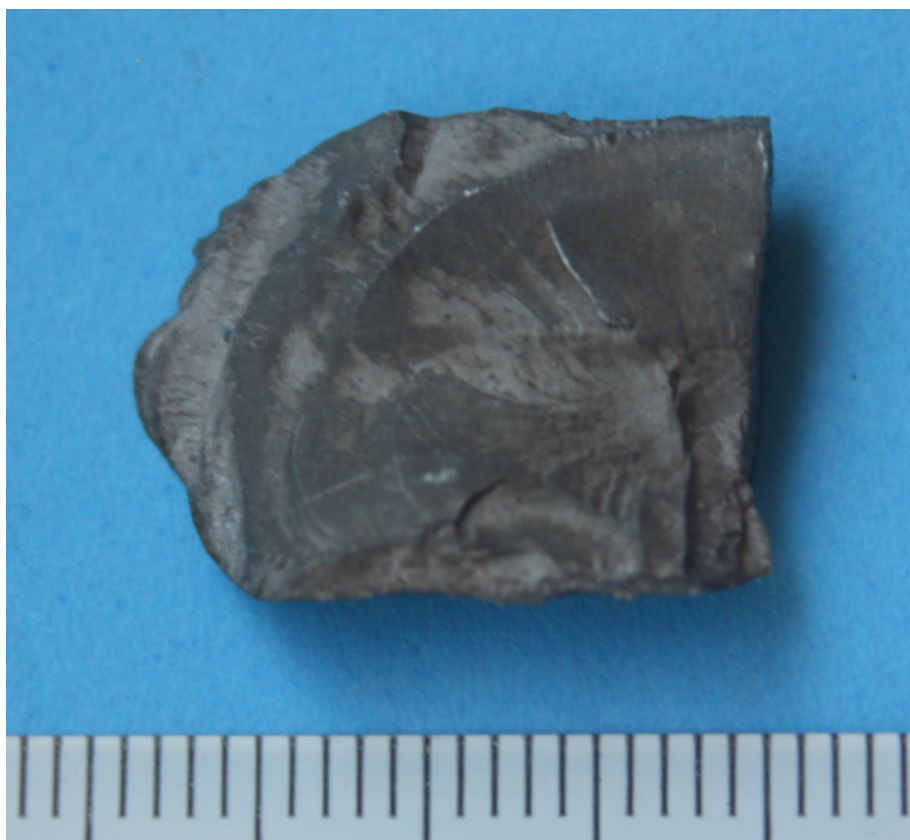
Slika 45. Krhotina 1 uzorka U4-1, prednja strana



Slika 46. Krhotina 1 uzorka U4-1, stražnja strana



Slika 47. Krhotina 2 uzorka U4-1, prednja strana



Slika 48. Krhotina 1 uzorka U4-1, prednja strana

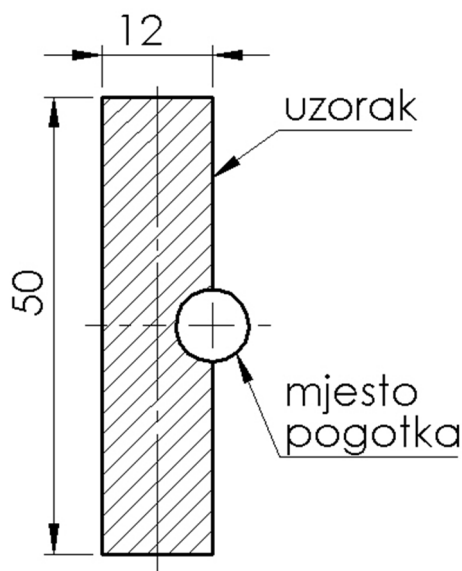
8. MAKRO ANALIZA

Makro analiza provedena je na 14 uzoraka. Svi uzorci su izrezani iz ploča U1-1, U1-2, U2-1, U2-2, U3-1, U3-2, U4-1, U4-2.

Uzorci T1-1, T2-2, T3-1 i T4-1 izrezani su iz balistički neispitanih uzoraka i poslužili su za makro analizu zavarenog spoja, vidjeti prilog tehničke dokumentacije: „U1-2, rezanje“ „U2-2, rezanje“ „U3-2, rezanje“ i „U4-2, rezanje“.

Uzorci H1-1, H1-2, H1-3, H1-5, H2-2, H3-2, H3-4, H4-1 i H4-2 izrezani su iz balistički oštećenih točaka tako da je bočna stranica uzorka izrezana na način da rez prolazi kroz centar mjesta udara, slika 49.

Svi uzorci osim H3-4 orijentirani su okomito na smjer zavarivanja.

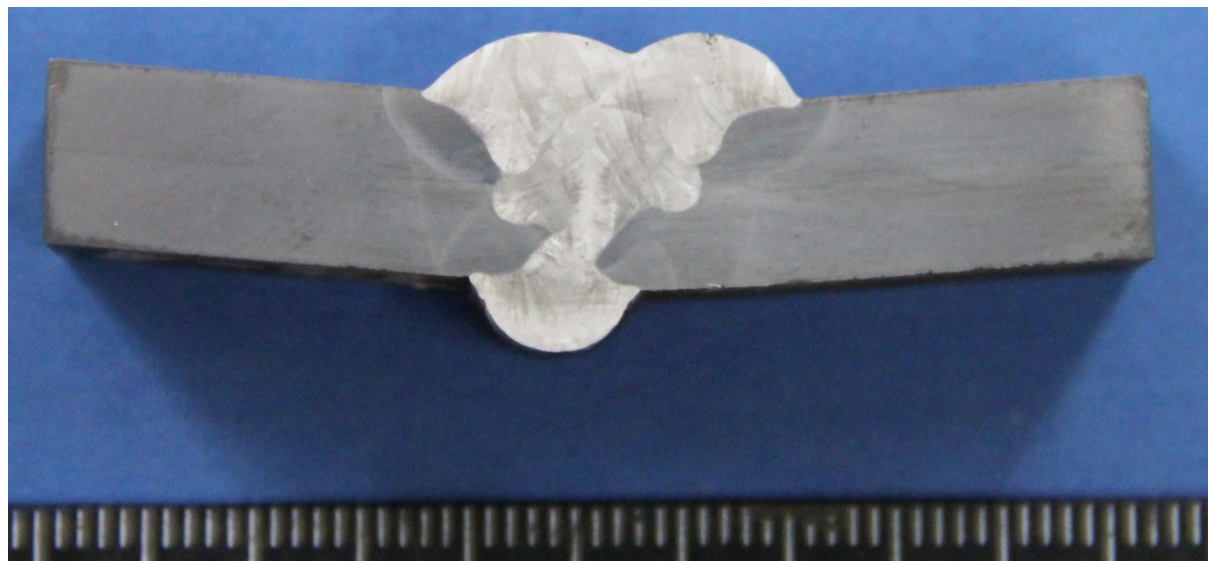


Slika 49. Uzorak balistički oštećenje točke

Rezano je tehnologijom abrazivnog vodenog mlaza. Dimenzije uzoraka su 12 x 50 x 8 mm.

Nakon rezanja, ispitne površine uzoraka su izbrušene brusnim papirom finoće 4000. Elektro nagrizanje je izvršeno u otopini 10 g CrO_3 u 100 ml vode pri jakosti struje od 3 A, naponu od 8 V s uzorkom na (+) polu u trajanju od 2 minute i 15 sekundi.

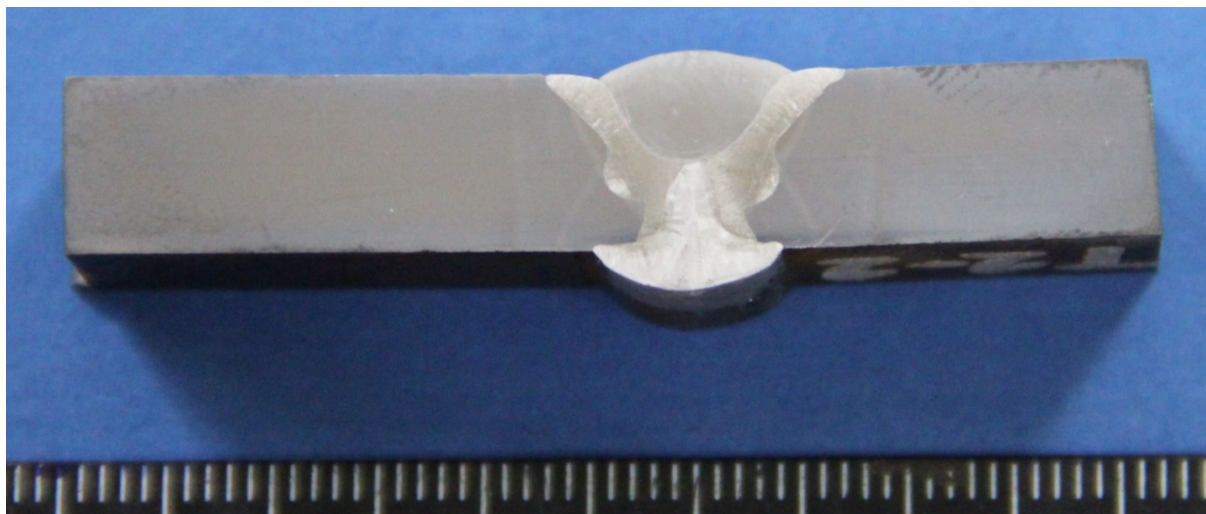
8.1. Uzorak T1-1



Slika 50. Uzorak T1-1

T1-1 makro izbrusak prikazuje prolaze i njihov oblik uzoraka U1-1 i U1-2, slika 50. Nadvišenje je više nego je potrebno. Zato što je slaganje prolaza uzoraka U3 i U4 trebalo izvesti prema planu (nadvišenje uzoraka U4 je prema zamisli moralo postojati), a optimalni parametri zavarivanja korištenih dodatnih materijala za tvrdo navarivanje i debljina dodatnog materijala nisu bili u idealnom omjeru, zavareno je s određenim nadvišenjem. Stoga su i uzorci U1-1 i U1-2 zavareni s većim nadvišenjem od potrebnog kako bi se rezultati mogli jednostavnije uspoređivati. U zavarenom spoju nema pora i uključaka. Penetracija svih prolaza je osigurana te nije došlo do naljepljivanja. ZUT međusloja, koji je zavaren manjim unosom topline od ostalih prolaza, ima najveću površinu iz razloga što je navarivan na svaku ploču zasebno te je odvođenje topline bilo duplo manje. Može se primijetiti da limovi nisu u istoj ravnini čemu je posljedica toplinsko stezanje tijekom hlađenja. Veliko nadvišenje je dovelo do dodatnog izvitoperenja.

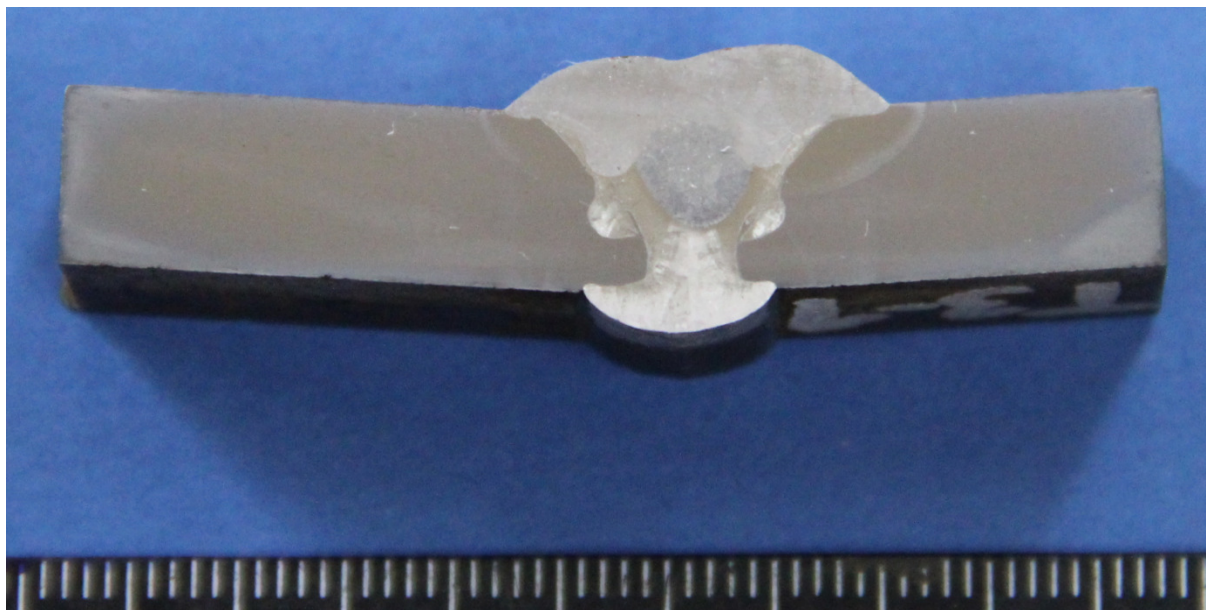
8.2. Uzorak T2-2



Slika 51. Uzorak T2-2

T2-2 makro izbrusak prikazuje prolaze i njihov oblik uzoraka U2-1 i U2-2, slika 51. Ovaj uzorak zorno prikazuje međuslojeve i njihov oblik. Kod T2-2 nije postojao pokrovni sloj te zavar posjeduje umjereno nadvišenje. Pore i uključci nisu prisutni u zavaru. Usporedbom penetracije dodatnog materijala za tvrdo navarivanje zavarenog FCAW postupkom i penetracije npr korijenskog prolaza zavarenog MIG-om valja primijetiti njihovu relativno veliku različitost.

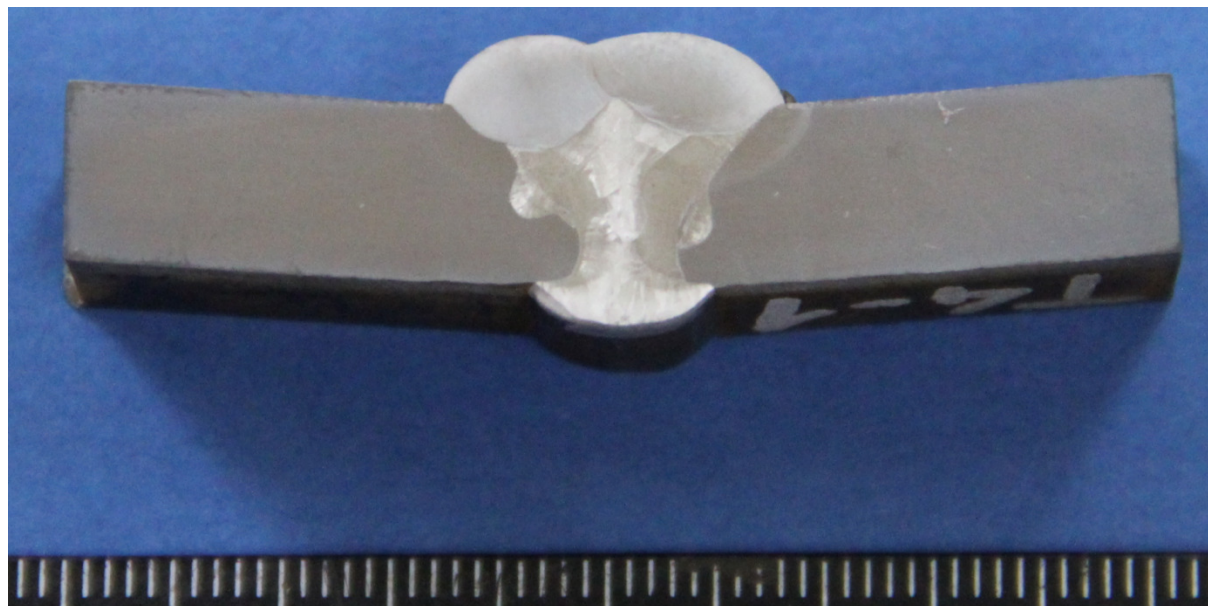
8.3. Uzorak T3-1



Slika 52. Uzorak T3-1

T3-1 makro izbrusak prikazuje prolaze i njihov oblik uzoraka U3-1 i U3-2, slika 52. U ovom uzorku se vidi središnji prolaz zavaren dodatnim materijalom za tvrdo navarivanje. Sličan oblik penetracije kao i kod uzorka T2-2 se može uočiti. Ukljucci i pore u zavaru nisu prisutni.

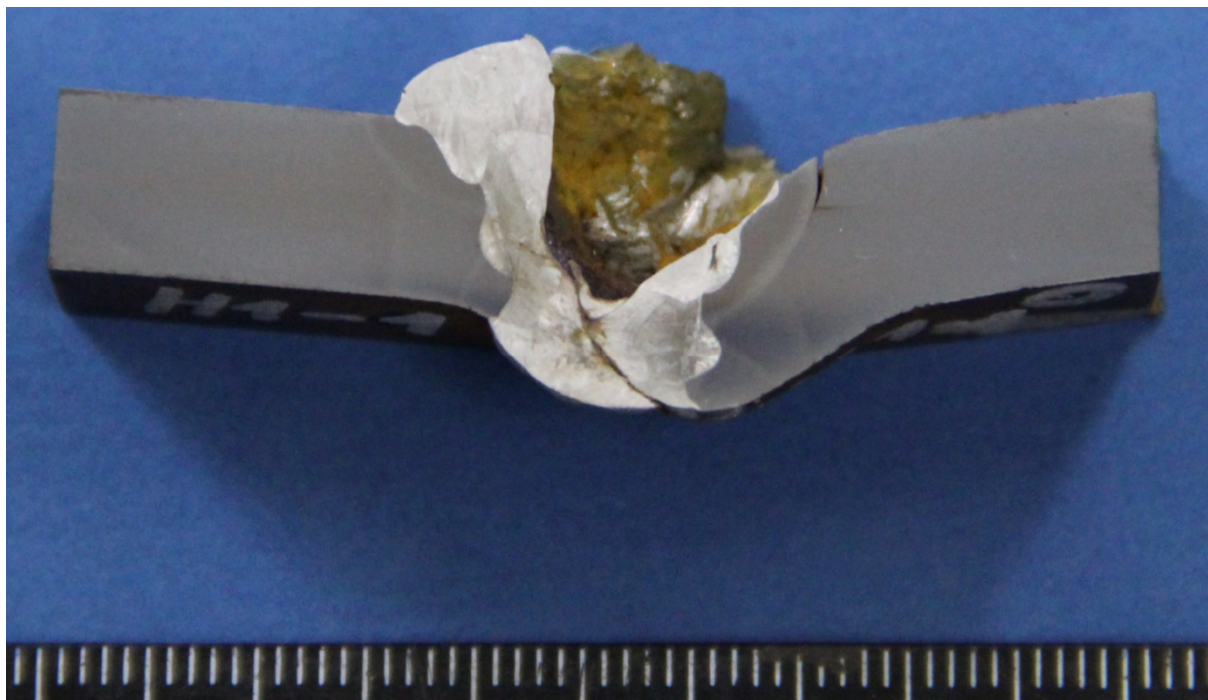
8.4. Uzorak T4-1



Slika 53. Uzorak T4-1

T4-1 makro izbrusak prikazuje prolaze i njihov oblik uzoraka U4-1 i U4-2, slika 53. Pokrovni slojevi zavareni FCAW postupkom tvrdim dodatnim materijalom prikazuju plitku penetraciju. Uključci i pore nisu prisutni u zavaru.

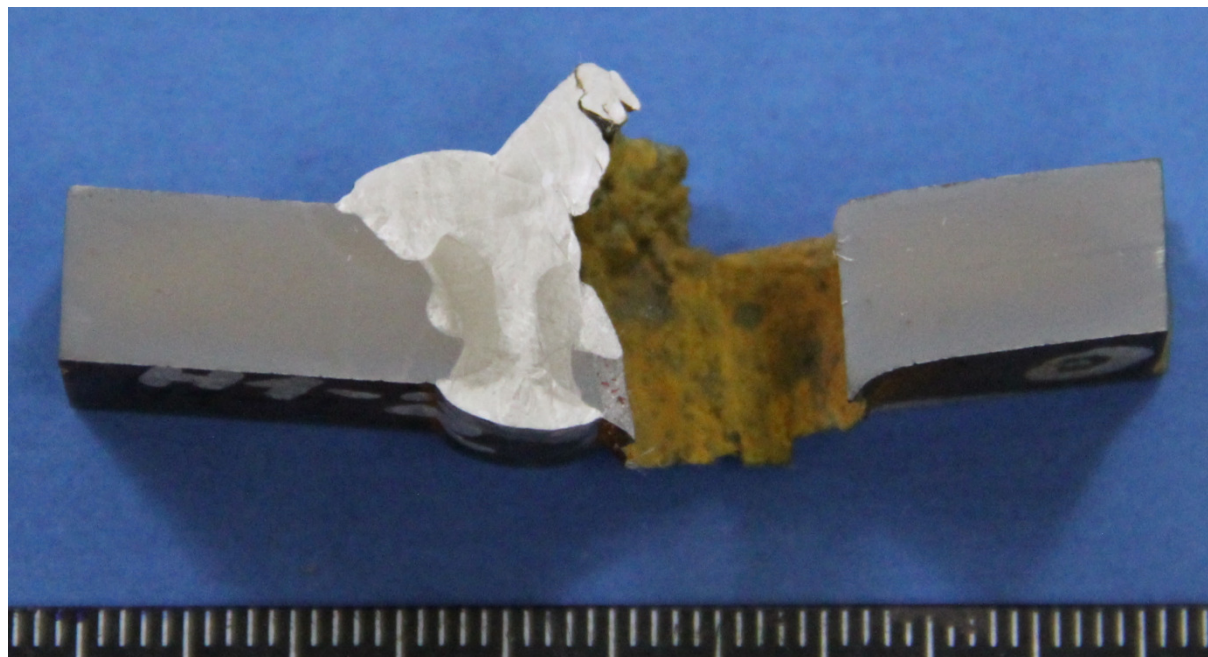
8.5. Uzorak H1-1



Slika 54. Uzorak H1-1

Na H1-1 makro izbrusku ispitana je probojnost, slika 54. Na njemu je vidljivo kako je prilikom udara zrna o površinu zavara došlo do nekoliko pojava. Prva je tečenje mekanog austenitnog materijala metala zavara uslijed djelovanja kinetičke energije udara i rezultirajućih valova. To je dovelo do stvaranja kratera na mjestu udara. Drugo, pojavila se pukotina u zoni granice ZUT-a gdje su za vrijeme udara djelovala vlačna naprezanja. Treće, po zoni staljivanja korijena javilo se klizanje materijala što je konačno dovelo do izrazitog ispupčenja na korijenskoj strani zavara.

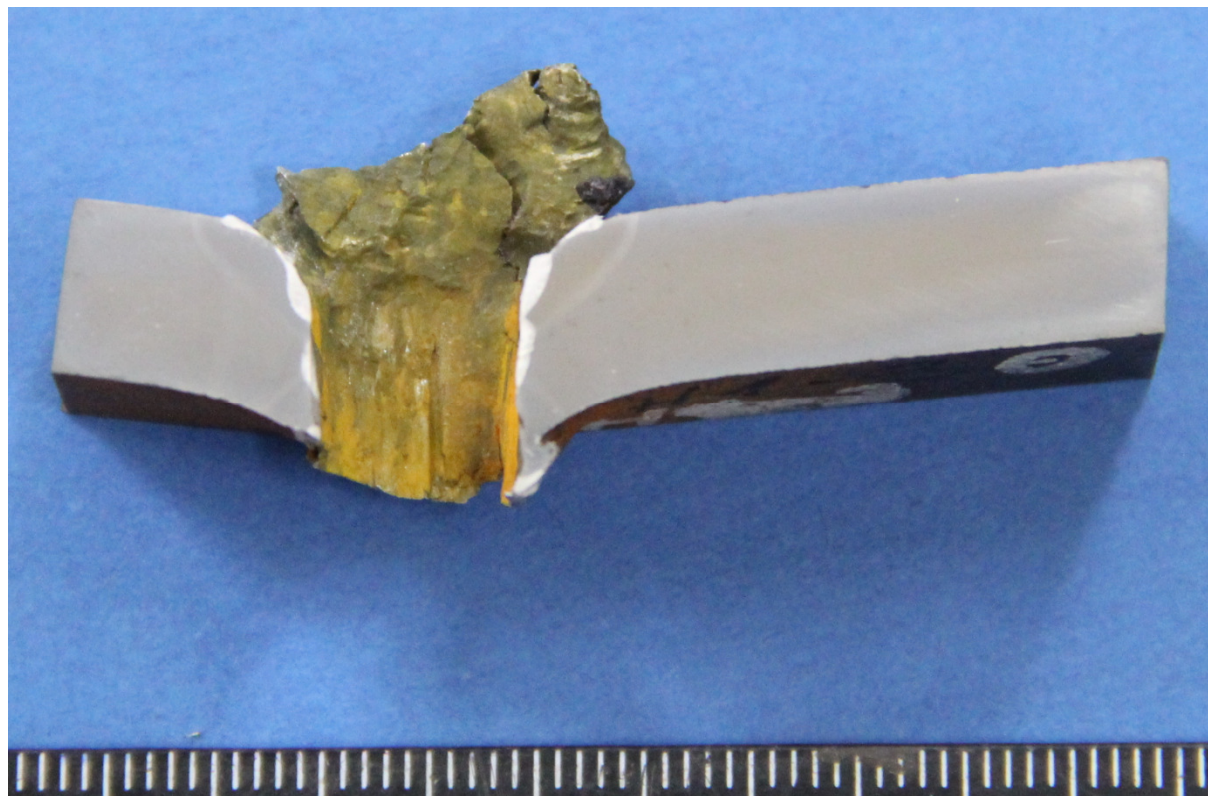
8.6. Uzorak H1-2



Slika 55. Uzorak H1-2

Na H1-2 makro izbrusku ispitana je probojnost, slika 55. On prikazuje rezultat pogotka u zonu staljivanja i ZUT. Vidljivo je uzdizanje metala zavara koje je rezultat djelovanja udarnih valova koji su se širili prilikom udara te ponašanja metala po zakonima mehanike uslije adijabatskih procesa koji se događaju tokom penetracije. Ovdje prisutan tip probijanja je plugging. Uzorak je izabran jer zorno prikazuje lošu otpornost ZUT-a na proboj.

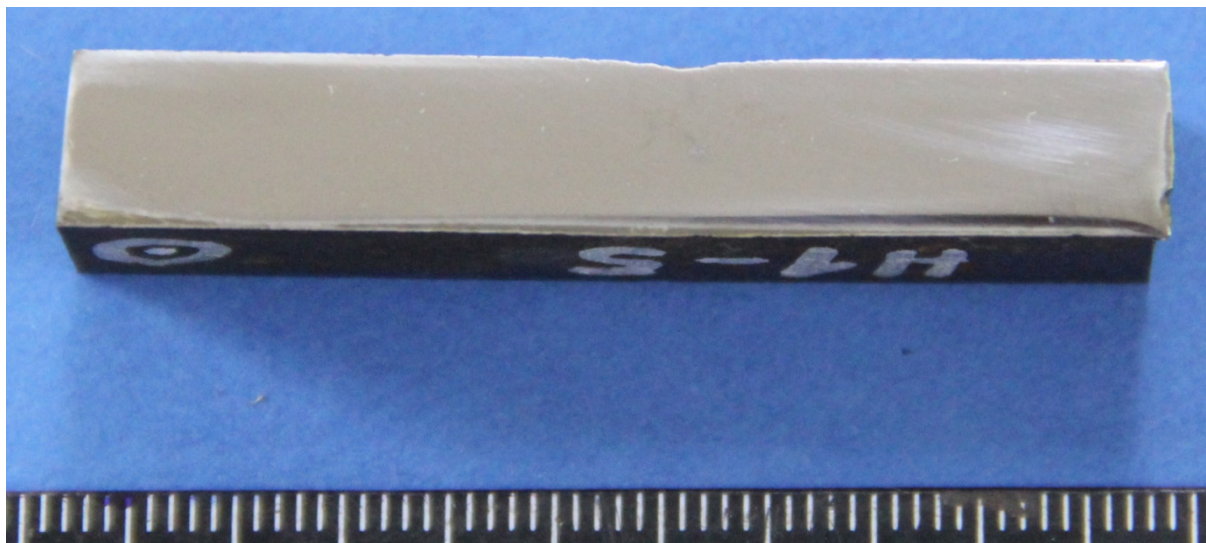
8.7. Uzorak H1-3



Slika 56. Uzorak H1-3

Na H1-3 makro izbrusku ispitana je probojnost, slika 56. On je primjer proboja pluggingom. Karakteristika ove vrste proboja je što projektil ispred sebe gura materijal na koji je naišao i izbacuje ga vani poput čepa iz boce. Vidljivo je značajno uzdizanje okolnog materijala. Takvo tečenje materijala slično je bacanju kamena u vodu koji, kada dotakne površinu vode, razmiče i gura sa strane vodu ispred sebe. Takvo ponašanje materijala daje se opisati mehanikom fluida.

8.8. Uzorak H1-5



Slika 57. Uzorak H1-5

Na H1-5 makro izbrusku ispitana je probojnost, slika 57. Prikazuje marginalno oštećenje uslijed udara zrna o osnovni materijal. Materijal bi uslijed višestrukih udara na isto mjesto izdržao proboju.

8.9. H2-2



Slika 58. Uzorak H2-2

Na H2-2 makro izbrusku ispitana je probojnost, slika 58. On prikazuje penetraciju uzorka 2. Primjećuje se kako je zrno uslijed proboja pluggingom odnijelo komad osnovnog materijala

zajedno s lijevim međuslojem. Tvrdi dodatni materijal je raspucao što znači da je preuzeo jedan dio opterećenja, ali ne dovoljan da odoli probodu zavora.

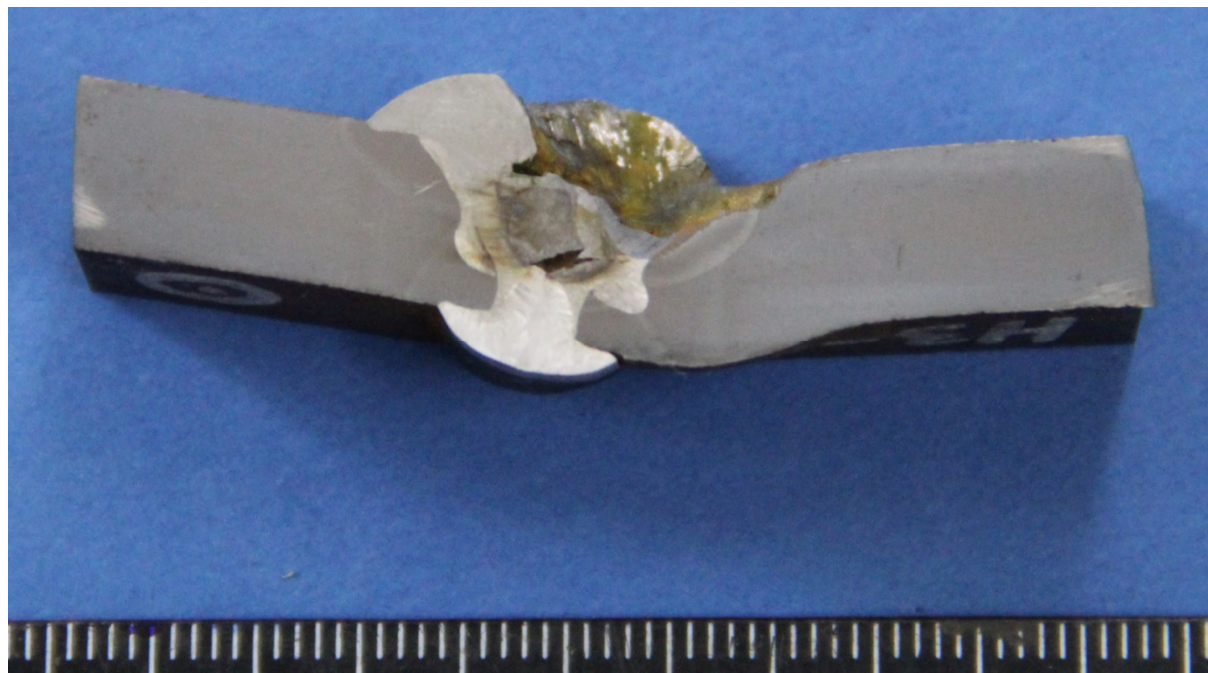
8.10. Uzorak H2-5



Slika 59. Uzorak H2-5

H2-5 makro izbrusak prikazuje proboj osnovnog materijala, slika 59. Tokom proboda javila su se oštećenja uslijed savijanja, kidanja i plugginga bez pojave adijabatskog tečenja. To je karakterističan proboj kvalitetnog pancirnog čelika čija je debljina premala s obzirom na zadano balističko opterećenje.

8.11. Uzorak H3-2



Slika 60. Uzorak H3-2

Na H3-2 makro izbrusku se ispitala probojnost, slika 60. On prikazuje oštećenje zavarenog spoja no ne i penetraciju. Uslijed udara sila je bolje raspoređena preko mekanog pokrovnog materijala na tvrdi materijal u sredini presjeka zavara. Ovime se postiglo to da zrno nije moglo proći prepreku od tvrdog materijala te je skrenulo u stranu. Uslijed skretanja, zrno je oštetilo tvrdi materijal te tako izgubilo energiju. Na strani na kojoj je zrno zaustavljeno se može primijetiti odvajanje po zoni staljivanja između korijenskog prolaza i osnovnog materijala.

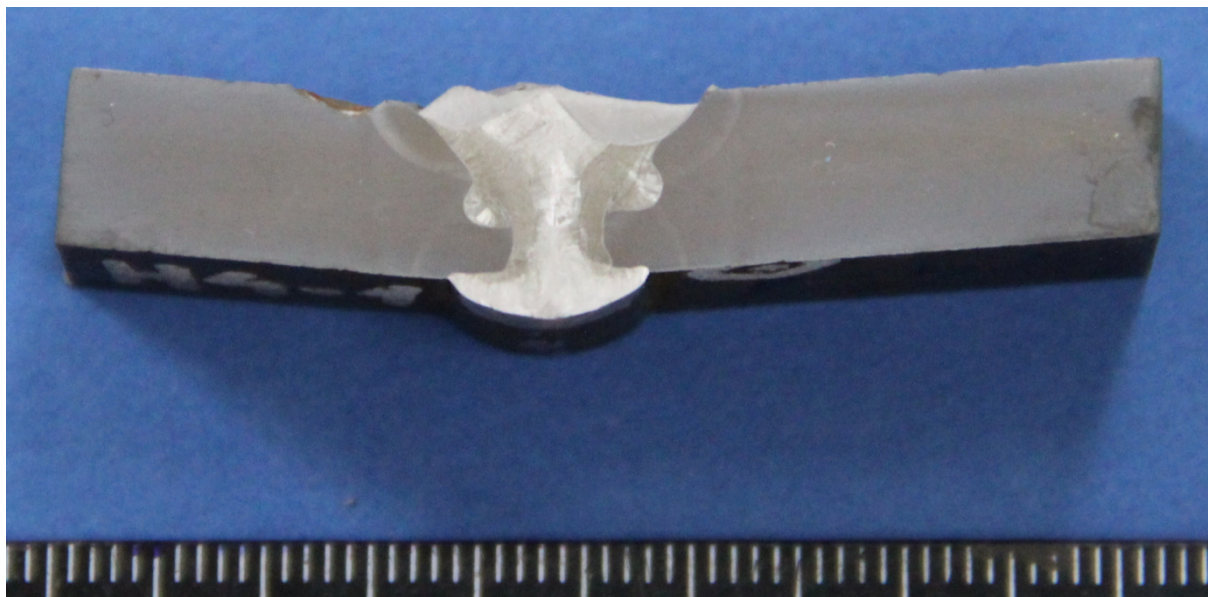
8.12. Uzorak H3-4



Slika 61. Uzorak H3-4

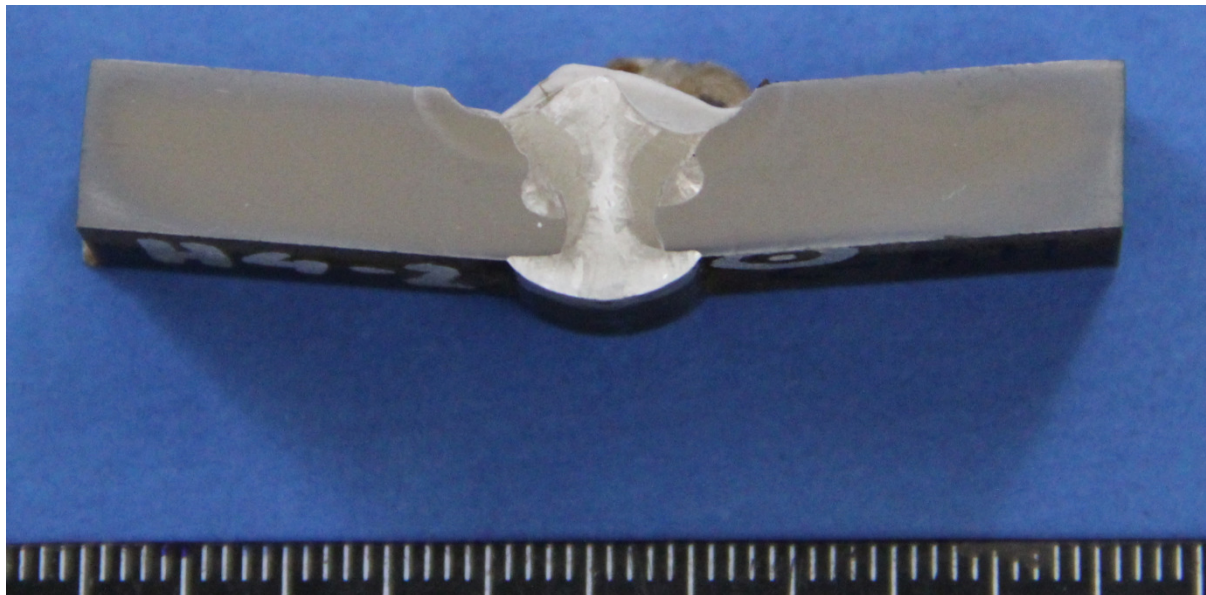
Na H3-4 makro uzorku se ispitivala probojnost, slika 61. On zorno prikazuje smjer i opseg djelovanja udarnog vala. Zrno je pogodilo tvrdi sloj u zavaru i izgubilo energiju na širenje pukotina u njemu. Preostala kinetička energija je potom raspoređena na većoj površini te su je na taj način preostali mekani slojevi absorbirali uz manju deformaciju na korijenskoj strani zavara. Mekani pokrovni materijal se po zakonima mehanike fluida, kojima se može opisati tečenje materijala uslijed adijabatskih procesa koji se događaju tokom penetracije, razmaknuo.

8.13. Uzorak H4-1



Slika 62. Uzorak H4-1

Na H4-1 makro izbrusku se ispitivala probojnost, slika 62. On prikazuje odlamanje površinskog tvrdog sloja i netaknutog materijala zavara ispod njega. Uslijed udara je tvrdi materijal rasporedio silu na velikom području i potrošio dio energije na svoje odvajanje i pucanje nakon čega je preostalu silu raspoređenu na velikom području preuzeo elastični i mekani materijal koji ju je amortizirao i apsorbirao. Tvrdi pokrovni sloj se odvajao u krupnim krhotinama, slike 45, 46, 47 i 48. Preostali materijal zavara ne pokazuje nikakve pukotine niti oštećenja koja bi ugrozila njegov integritet.

8.14. Uzorak H4-2**Slika 63. Uzorak H4-2**

Na H4-1 makro izbrusku se ispitivala probojnost, slika 63. Ispitivanja na provedena na njemu su pokazala identične pojave kao i kod H4-1 makro izbruska.

9. ISPITIVANJE TVRDOĆE

Ispitivanje tvrdoće provedeno je u skladu s HRN EN ISO 6507-1:2008. Ispitan je svaki prolaz svakog zavara s po 4 otiska iz čijih je vrijednosti dijagonala izračunata prosječna vrijednost tvrdoće pojedinog prolaza, tablice 21., 22., 23. i 24. Uz tablice priložene su i slike 64., 65., 66. i 67. na kojima su prikazana mjesta indentacija.

Dodatno je ispitana tvrdoća ZUT-a uz površine prednje i stražnje strane te po sredini, tablica 20. Udaljenost od gornje i donje površine je 0,5 mm, a razmak između indentacija 1 mm. Srednji red ispitanih mjesta tvrdoća prolazio je točno po sredini presjeka, na 4 mm od svake površine. Početna točka ispitivanja (broj 1. u tablici 21.) udaljena je 1 mm od zone staljivanja.

Tablica 21. Rezultati mjerenja tvrdoće ZUT-a

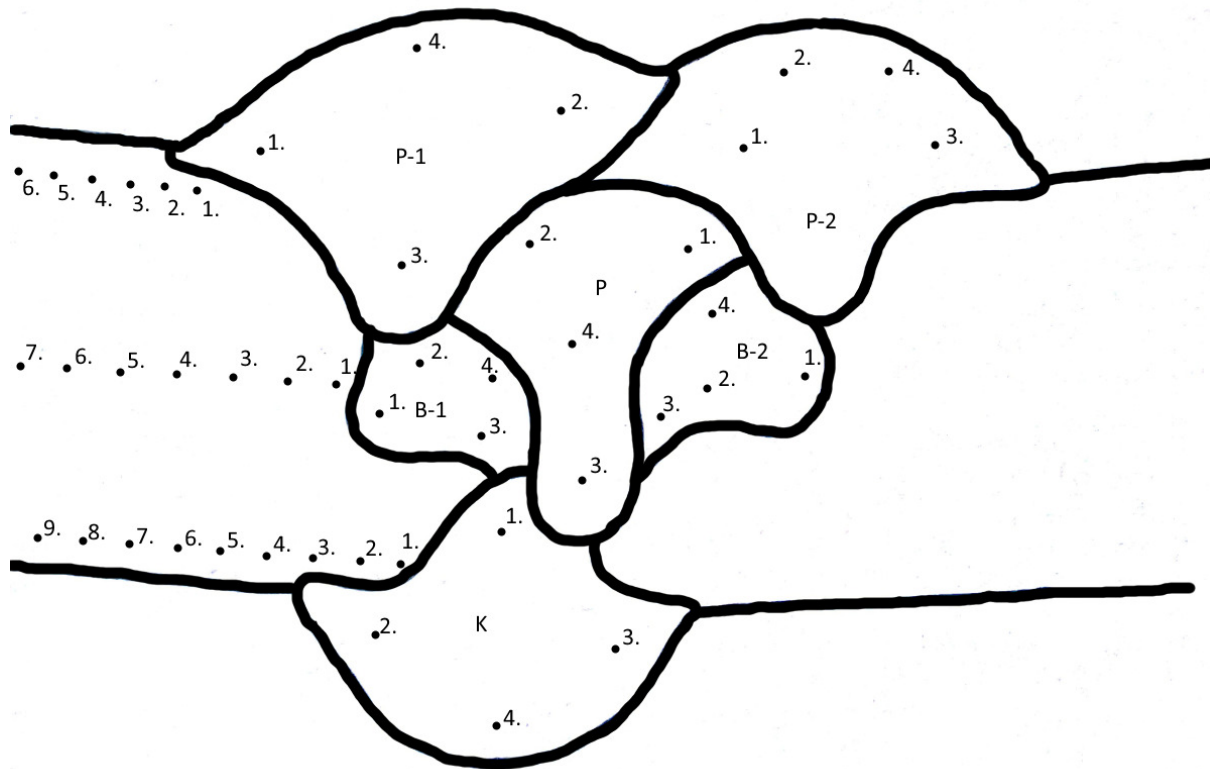
Redni broj indentacije	Tvrdoća po položaju ispitanog niza, HV10		
	prednja strana	stražnja strana	sredina
1.	478	312	270
2.	473	283	339
3.	473	312	333
4.	294	327	363
5.	351	309	314
6.	380	336	312
7.	405	366	343
8.	417	390	360
9.	417	405	409
10.	417	417	417
11.	421	421	429
12.	421	437	442
13.	429	437	446
14.	455	450	464
15.	429	455	473
16.	455	459	478
17.	473	464	483
18.	478	473	487
19.	481	478	490
20.	483	481	492

Iz tablice 21. jasno se može vidjeti ZUT i djelovanje na mikrostrukturu unutar njega, a time i posljedičnu promjenu svojstava materijala. Iz prikazanih podataka mogu se primijetiti zakaljena zona i zona normalizacije. Zona popuštanja je zona u kojoj je smanjena tvrdoća. Iz tablice se može iščitati kako se ona, zona normalizacije, javlja između 4. i 6. milimetra od zone staljivanja. Zbog te smanjene tvrdoće materijal je na tom mjestu neotporan na balističko opterećenje tj. probojnost.

9.1. Uzorak T1-1

Tablica 22. Rezultati mjerenja tvrdoće uzorka T1-1, HV10

Pozicija mjerenja	$P_{T1-1}1$	$P_{T1-1}2$	P_{T1-1}	$B_{T1-1}1$	$B_{T1-1}2$	K_{T1-1}
1.	149	141	156	206	209	173
2.	150	154	163	182	181	159
3.	154	159	175	171	188	169
4.	131	134	188	198	191	160
prosječna vrijednost	146	147	170,5	189,2	192,2	165,2

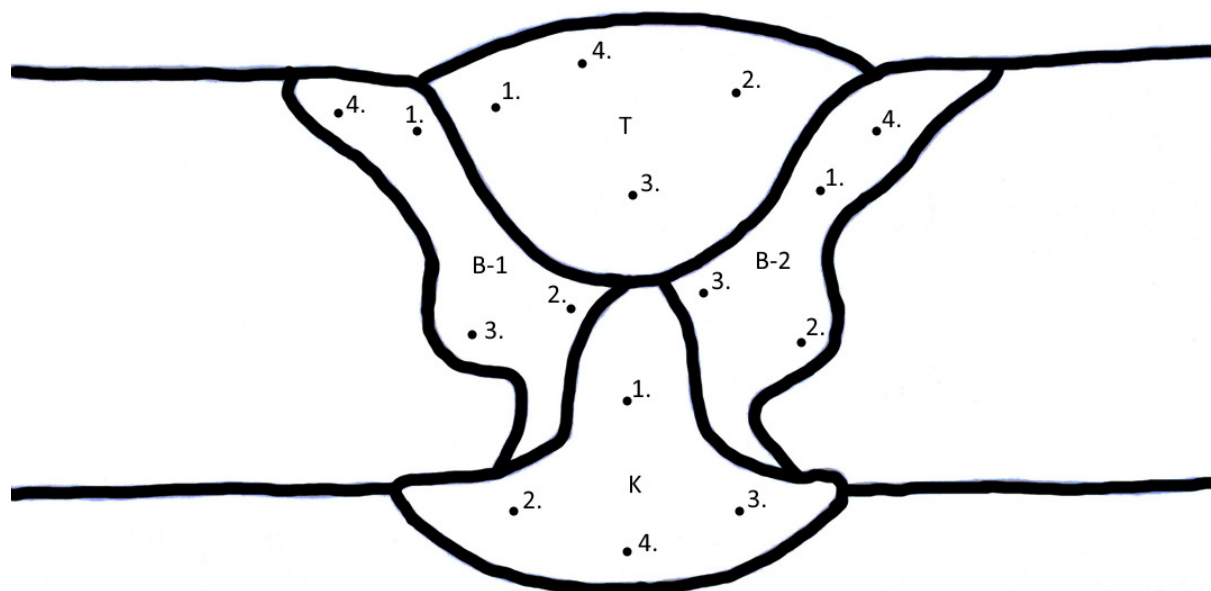


Slika 64. Mjesta otisaka na uzorku T1-1

9.2. Uzorak T2-2

Tablica 23. Rezultati mjerenja tvrdoće uzorka T2-2, HV10

Pozicija mjerenja	T_{T2-2}	$B_{T2-2}1$	$B_{T2-2}2$	K_{T2-2}
1.	847	206	183	179
2.	813	183	218	168
3.	813	175	179	158
4.	847	178	181	182
prosječna vrijednost	830	185,5	190	171,5



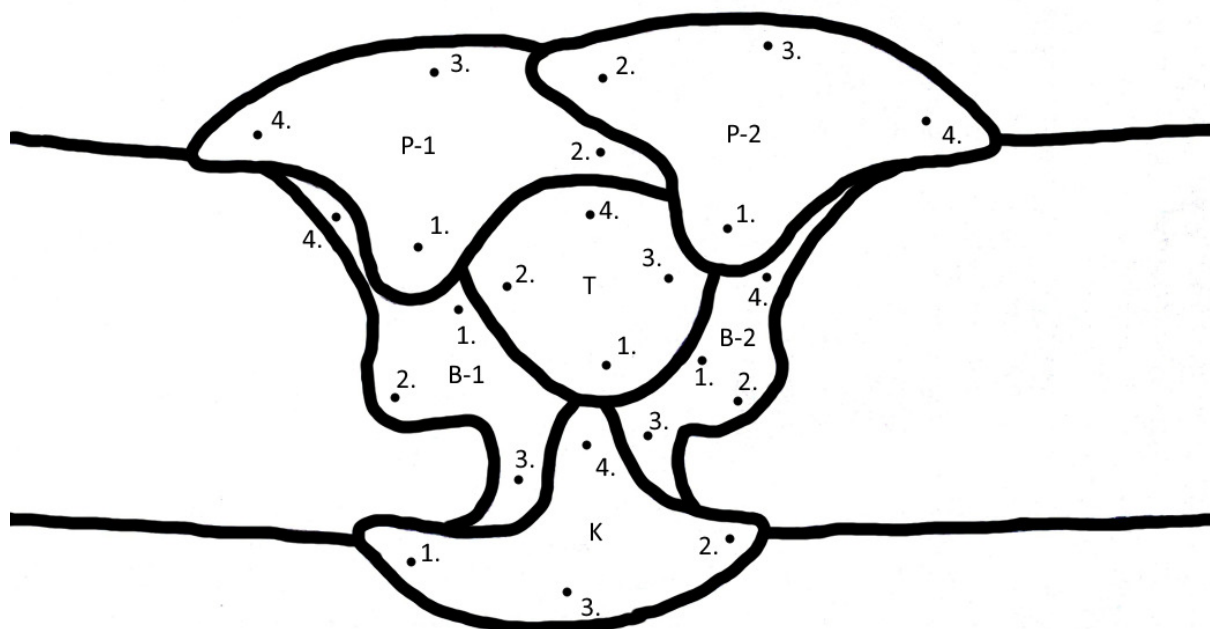
Slika 65. Mjesta otisaka na uzorku T2-2

Tvrđi sloj T_{T2-2} uzorka T2-2 pokazuje nešto niže vrijednosti tvrdoće od prolaza $T_{T4-1}2$ uzorka T4-1 iako je korišten isti dodatni materijal. Razlog tome leži u nešto većem miješanju materijala s prethodnim slojevima tokom zavarivanja.

9.3. Uzorak T3-1

Tablica 24. Rezultati mjerenja tvrdoće uzorka T3-1, HV10

Pozicija mjerenja	$P_{T3-1}1$	$P_{T3-1}2$	T_{T3-1}	$B_{T3-1}1$	$B_{T3-1}2$	K_{T3-1}
1.	175	178	262	228	235	186
2.	189	156	279	219	219	185
3.	285	170	285	219	213	152
4.	283	164	283	198	180	198
prosječna vrijednost	233	167	277,25	216	211,75	180,25



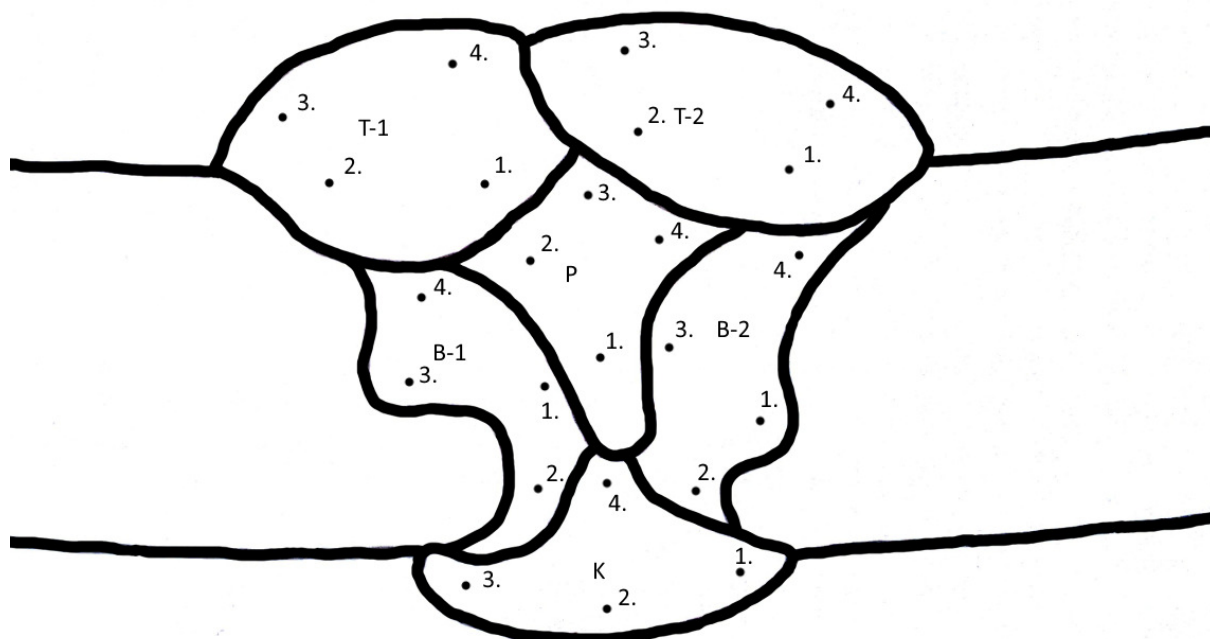
Slika 66. Mjesta otisaka na uzorku T3-1

Tvrdoće tvrdog sloja T_{T3-1} uzorka T3-1 pokazale su vrijednosti značajno niže od očekivanih. Uzrok tome je odžarivanje tvrdog sloja T_{T3-1} narednim prolazima, $P_{T3-1}1$ i $P_{T3-1}2$.

9.4. Uzorak T4-1

Tablica 25. Rezultati mjerenja tvrdoće uzorka T4-1, HV10

Pozicija mjerenja	$T_{T4-1}1$	$T_{T4-1}2$	P_{T4-1}	$B_{T4-1}1$	$B_{T4-1}2$	K_{T4-1}
1.	782	847	179	178	227	185
2.	673	870	162	206	213	186
3.	681	870	155	197	210	196
4.	772	858	155	178	188	199
prosječna vrijednost	727	861	162,7	189,7	209,5	191,5



Slika 67. Mjesta otisaka na uzorku T4-1

Sloj $T_{T4-1}1$ pokazuje značajno manje tvrdoće od sloja $T_{T4-1}2$. Razlog tom efektu je isti kao i kod uzorka T3-1, smanjena tvrdoća uslijed odžarivanja narednim slojem.

10. ISPITIVANJE VLAČNE ČVRSTOĆE

Ispitivanje vlačne čvrstoće provedeno je u skladu s HRN EN ISO 6892-1:2010. Ispitana su po dva uzorka svakog tipa zavora. U tablici 26. su prikazane samo veličine sile pri kojoj su epruvete puknule iz razloga što debljina zavora značajno odskakače od osnovnog materijala. Ukoliko bi se računalo naprezanje, ono ne bi bilo dovoljno precizno niti relevantno. Standardne epruvete nisu rađene jer bi u tom slučaju obrada zavarenog spoja bila prevelika te bi rezultati bili nerelevantni. Uz sile kidanja iz ovog ispitivanja mogu se vidjeti zone u kojima je došlo do pucanja kao i efekti koji su se događali u materijalu.

Tablica 26. Rezultati vlačnog ispitivanja

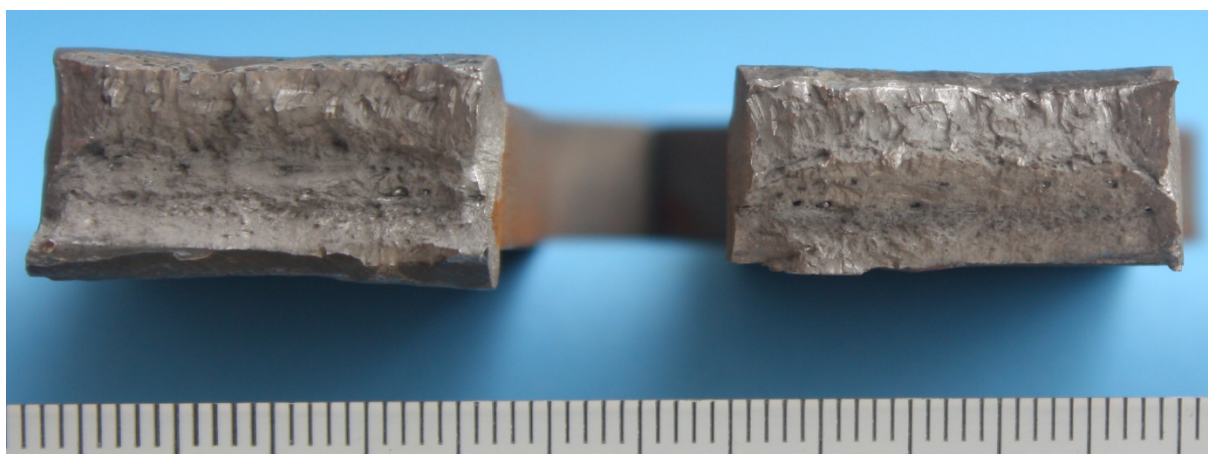
Oznaka uzorka	Sila kidanja [kN]
K1-1	204
K1-2	195
K2-1	120
K2-2	116
K3-1	91
K3-2	98
K4-1	124
K4-2	131

10.1. Uzorci K1-1 i K1-2

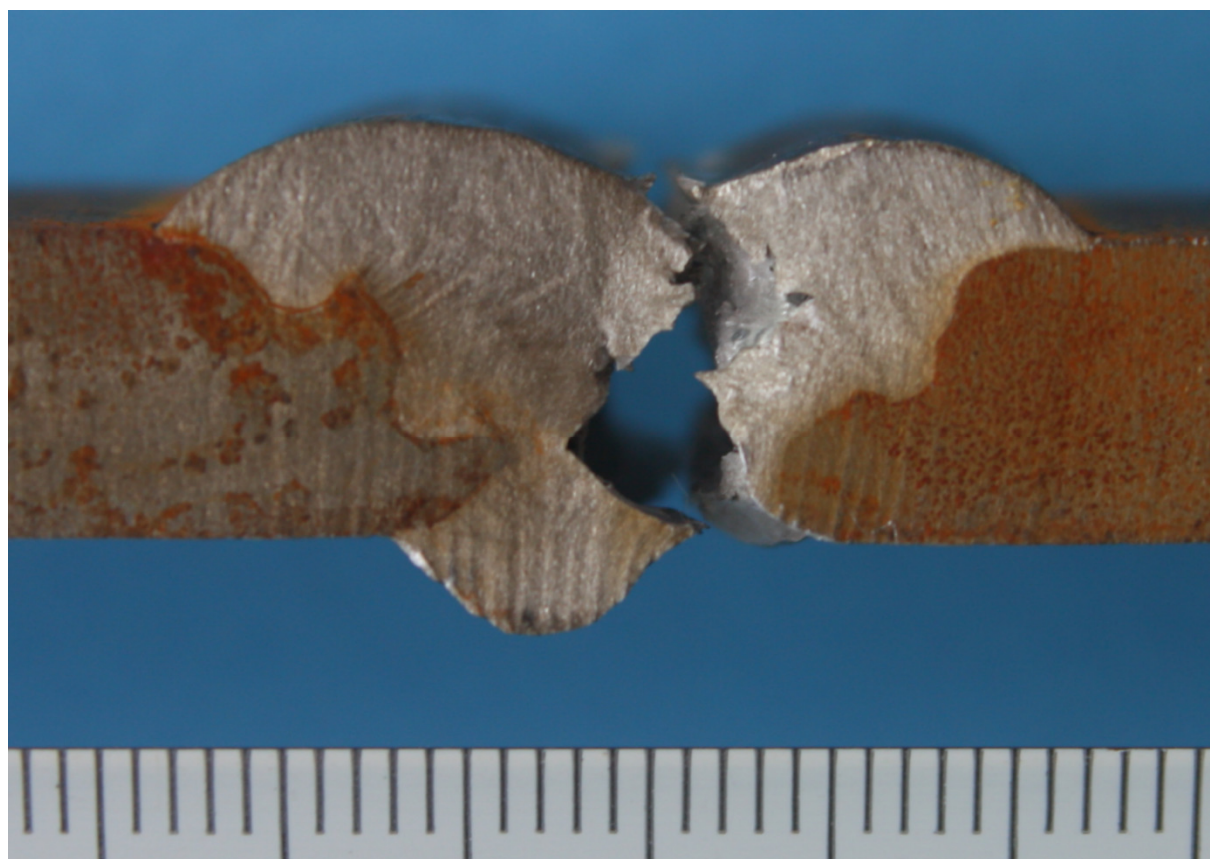
Na uzorcima K1-1 i K1-2 jasno se vidi kako je do loma došlo u metalu zavara i po liniji staljivanja korijena uz relativno veliku plastičnu deformaciju, slike 68., 69., 70. i 71.



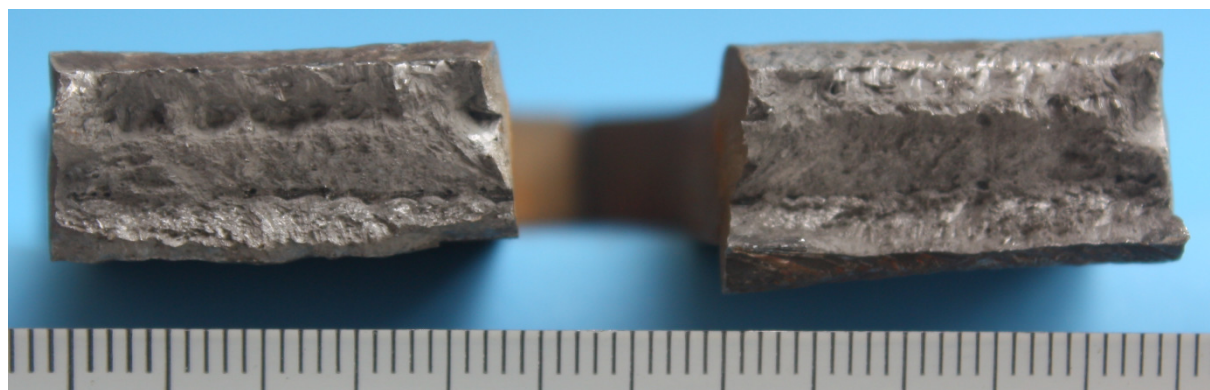
Slika 68. Uzorak K1-1, bočni pogled



Slika 69. Uzorak K1-1, frontalni pogled



Slika 70. Uzorak K1-2, bočni pogled



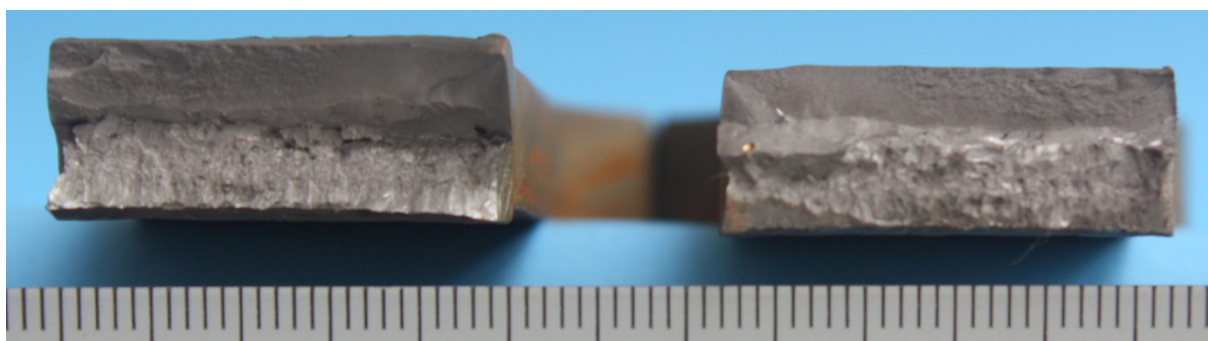
Slika 71. Uzorak K1-2, frontalni pogled

10.2. Uzorci K2-1 i K2-2

Lom nastao uslijed vlačnog ispitivanja uzoraka K2-1 i K2-2 uvijek je propagirao po granici staljivanja s tvrdim materijalom i u njegovoj neposrednoj blizini težeći prema unutrašnjosti tvrdog prelazeći na elastični dodatni materijal korišten u korijenu, slike 72., 73., 74. i 75. Relativno niske vrijednosti sile kidanja (tablica 26.) rezultat su velikih razlika u krutosti dvaju materijala. Krući materijal, posljednje zavareni prolaz, nosio je većinu naprezanja te je uslijed njegovog popuštanja došlo do naglog smanjenja presjeka i zareznog djelovanja nakon čega je preostali dio zavara, koji je izveden od manje krutog materijala, puknuo.



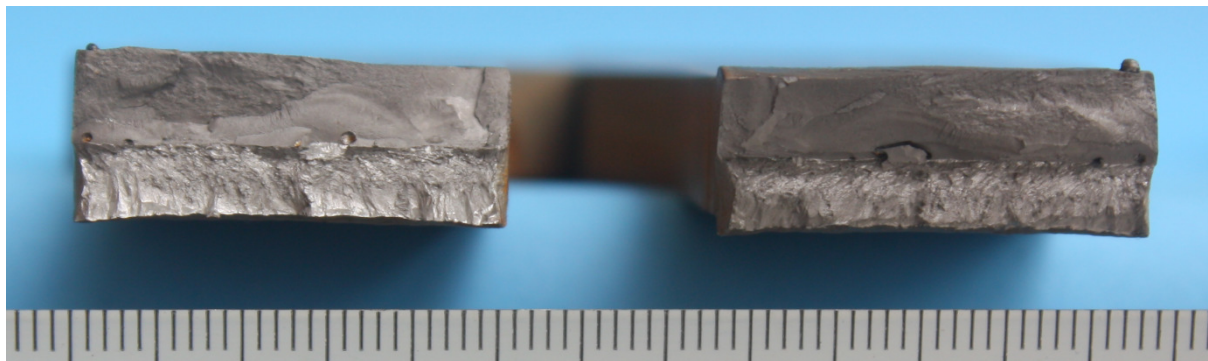
Slika 72. Uzorak K2-1, bočni pogled



Slika 73. Uzorak K2-1, frontalni pogled



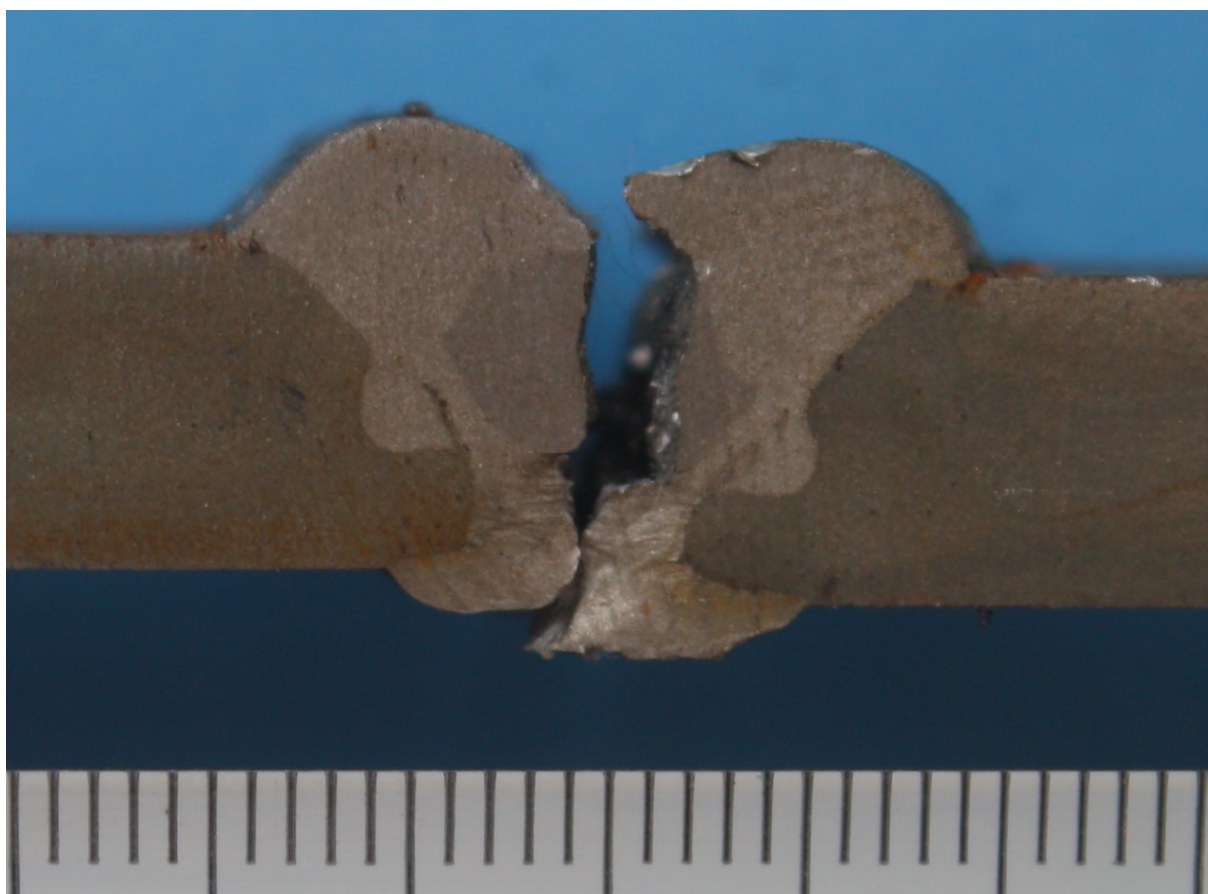
Slika 74. Uzorak K2-2, bočni pogled



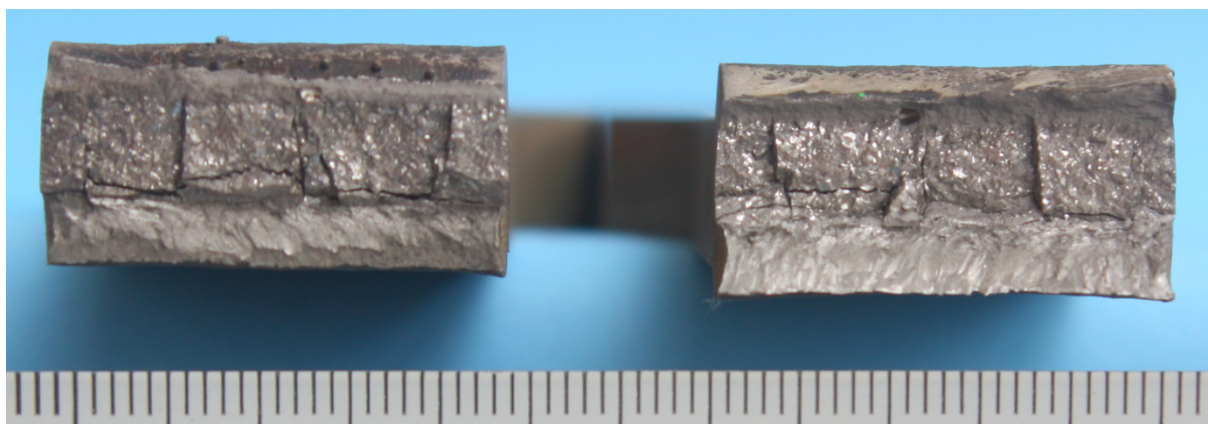
Slika 75. Uzorak K2-2, frontalni pogled

10.3. Uzorci K3-1 i K3-2

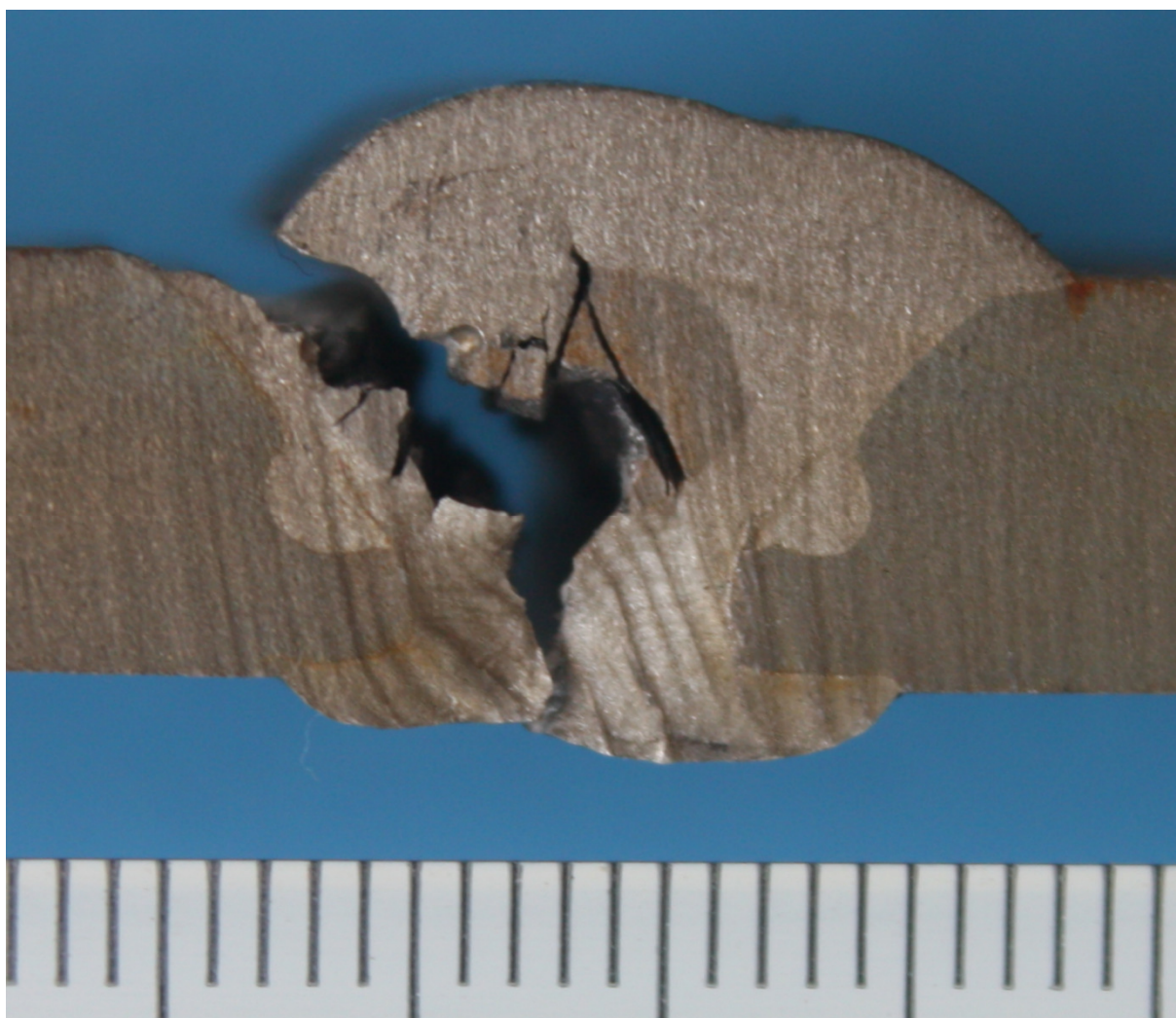
Linija pucanja uzoraka K3-1 i K3-2 uslijed ispitivanja statičkim vlačnim pokusom prikazuje pucanje krutog dodatnog materijala okruženog elastičnim okolnim dodatnim materijalom zavar. Taj zavar ima znatno nižu silu kidanja. Razlog tome su tople pukotine koje su se javile tokom zavarivanja materijala za tvrdo navarivanje i koje su ostale u tom prolazu iako je izgubio željenu tvrdoću uslijed odžarivanja narednim prolazima.



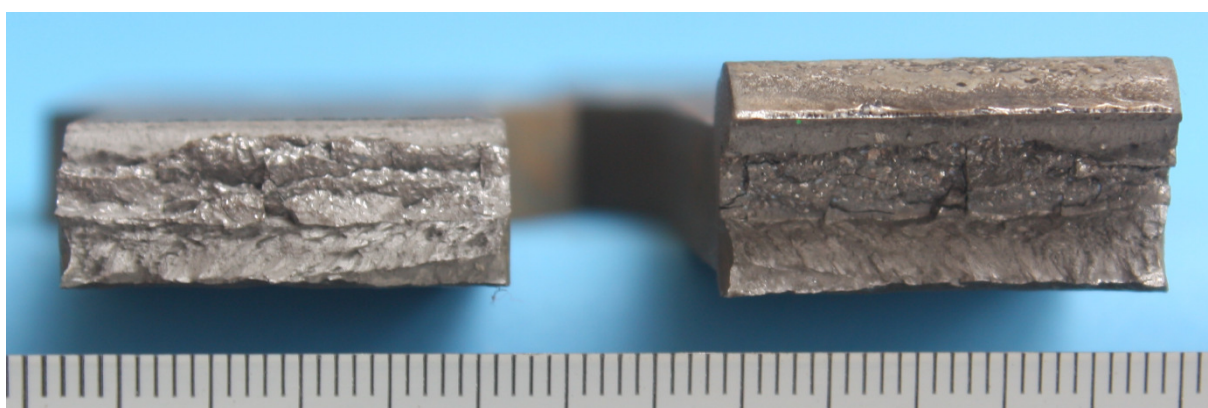
Slika 76. Uzorak K3-1, bočni pogled



Slika 77. Uzorak K3-1, frontalni pogled



Slika 78. Uzorak K3-2, bočni pogled



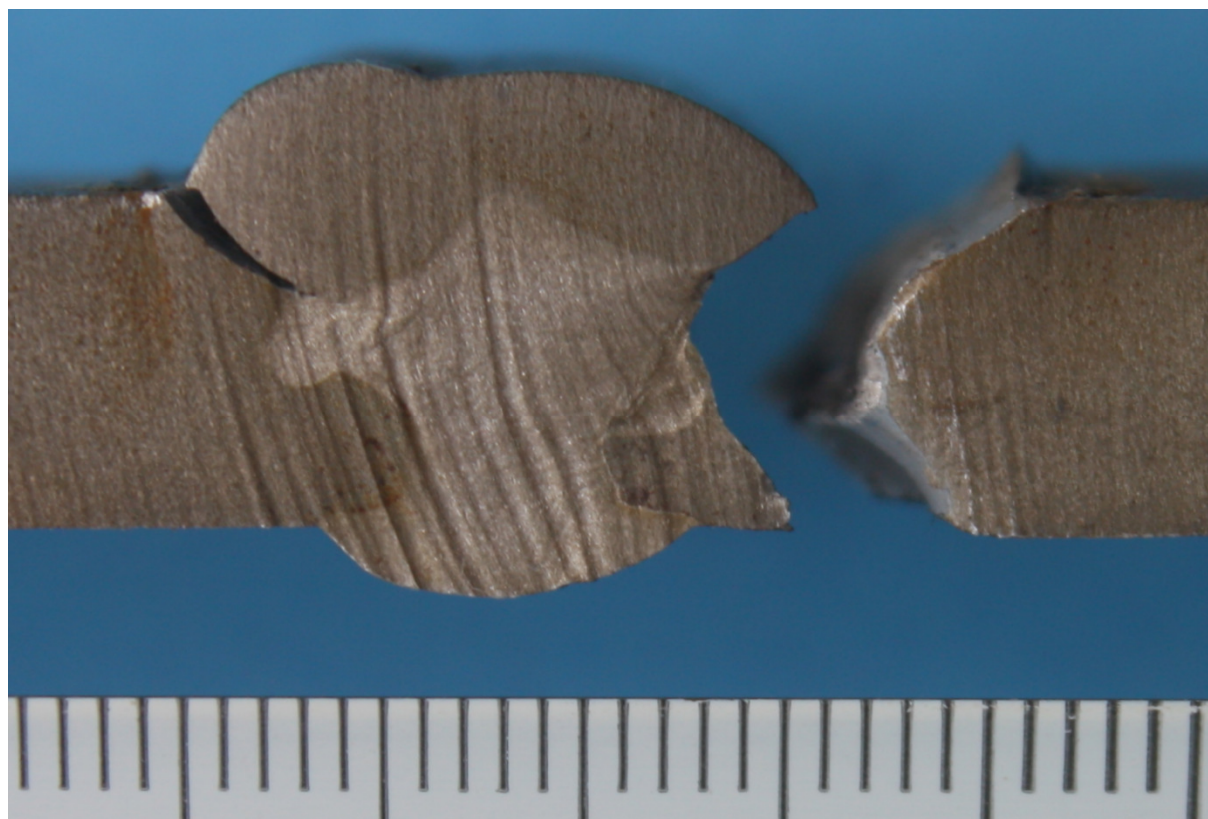
Slika 79. Uzorak K3-2, frontalni pogled

10.4. Uzorci K4-1 i K4-2

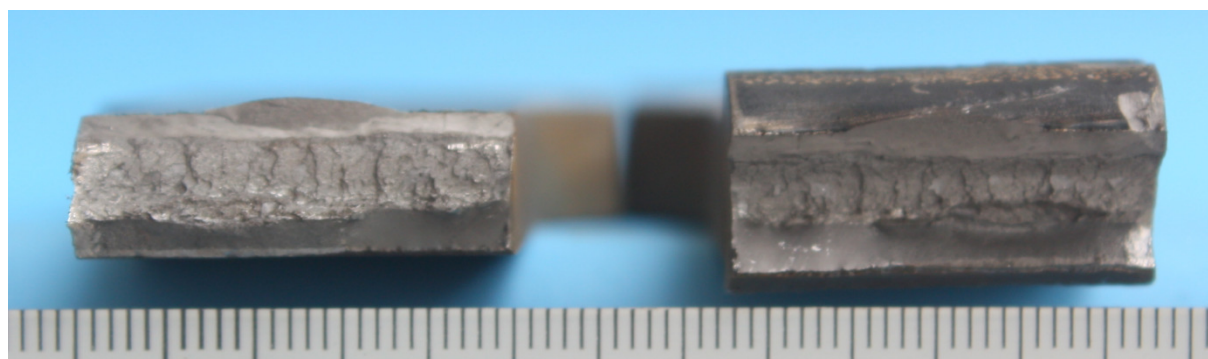
Ispitivanje statičkim vlačnim pokusom uzoraka K4-1 i K4-2 ukazuje na sličan problem kao i kod uzoraka K2-1 i K2-2. Kako se sila kidalice tokom ispitivanja povećavala, kruti materijal (kojemu je zona staljivanja slabije čvrstoće od osnovnog materijala) prenosio je većinu opterećenja. Uslijed njegovog popuštanja došlo je do smanjenja presjeka i smanjene nosivosti. Kada je sila dosegla vrijednost koju materijal više nije mogao podnijeti došlo je do propagacije pukotine koja se širila kroz međuslojni prolaz i naposljetku kroz ZUT nedaleko od korijena. To se lako može zaključiti iz toga što je na oba uzorka zona staljivanja tvrdog dodatnog materijala popustila na strani zavara kroz koji nije prošao konačan lom.

Treba primijetiti kako su krajnje točke staljivanja tvrdog dodatnog materijala zapravo izvan međusloja i direktno su zavarene za osnovni materijal. Takva zona staljivanja pokazuje manju čvrstoću od zone staljivanja između tvrdog dodatnog materijala i elastičnog austenitnog dodatnog materijala dobivene po cijelom presjeku kod zone staljivanja uzoraka K2-1 i K2-2.

Ukupno veća podnesena prekidna sila posljedica je većeg presjeka elastičnog austenitnog dodatnog materijala kojim je zavarena većina spoja.



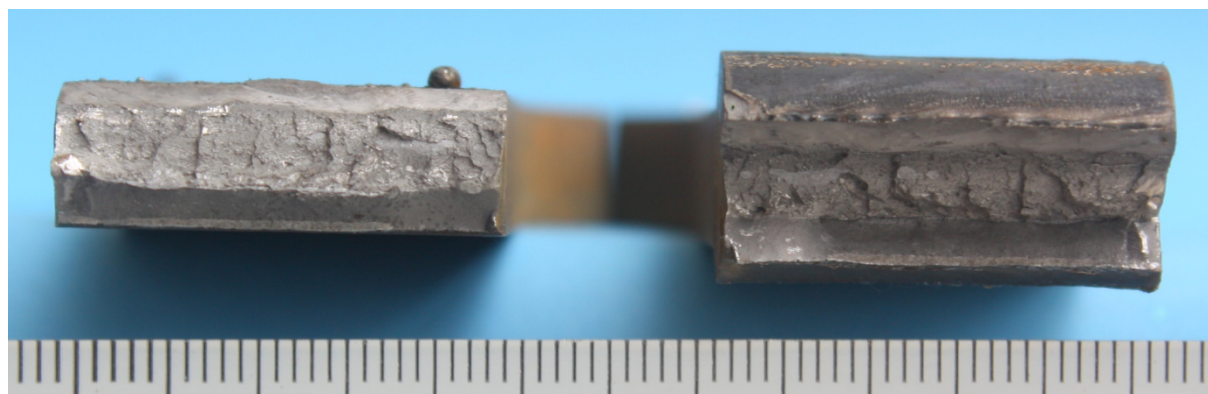
Slika 80. Uzorak K4-1, bočni pogled



Slika 81. Uzorak K4-1, frontalni pogled



Slika 82. Uzorak K4-2, bočni pogled

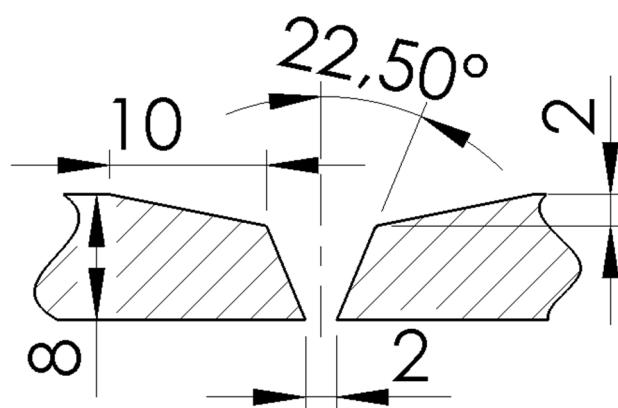


Slika 83 Uzorak K4-2, frontalni pogled

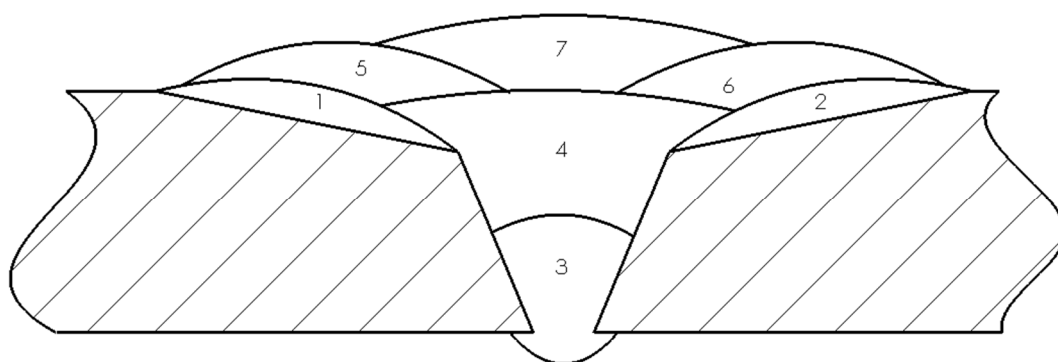
11. PREPORUKA ZA DALJNI RAZVOJ

Na osnovu tih razmatranja predlaže se daljnje istraživanje:

- Geometrija pripreme spoja i redoslijed zavarivanja prikazani su na slikama 84. i 85. Slojeve 1, 2, 3 i 4 treba izvesti iz dodatnog materijala austenitne strukture, a slojeve 5, 6 i 7 treba izvesti iz dodatnog materijala za tvrdo navarivanje.
- Međuslojevi 3 i 4 trebali bi biti navareni tek nakon zavarivanja korijenskog i prolaza popune kako bi se postiglo što bolje odvođenje topline. Međuslojeve treba izvesti što je moguće tanjom žicom dodatnog materijala kako bi se mogao održati stabilan električni luk pri što manjim parametrima te tako svesti unos topline na minimum.
- Pokrovni slojevi 5, 6 i 7 trebaju prekrivati zavar i većinu ZUT-a te tako osigurati balističku neprobojnost.
- Pokrovni slojevi tvrdog dodatnog materijala ne smiju prelaziti međusloj već se moraju isključivo zavarivati na njega.
- Kako bi se dobila zadovoljavajuća nosivost spoja, trebalo bi koristiti skoro puni presjek zavara izveden dodatnim materijalom austenitne strukture.
- Dodatni materijal austenitne strukture se koristi i iz razloga što dobro podnosi udarna opterećenja zbog svojih fizikalnih svojstava te tako apsorbira i amortizira energiju dobivenu tokom balističkog opterećenja.



Slika 84. Oblikovanje budućeg spoja



Slika 85. Redoslijed zavarivanja budućeg spoja

12. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenih zavarivačkih procesa i njihovim ispitivanjima kao i , mogu se donijeti zaključci u pogledu balističke otpornosti zavara i njegovih mehaničkih svojstava te na osnovu toga preporučiti daljnji smjer istraživanja.

S obzirom na balističku otpornost zadovoljili su uzorci U3 i U4 što ostala dva uzorka, U1 i U2, ne čini relevantnima za daljnja balistička razmatranja. Uzorak U3 imao je lošije performanse u odnosu na uzorak U4 u nekoliko bitnih točaka. U3 je za vrijeme balističkih ispitivanja pokazao relativno velika oštećenja metala zavara koja se naknadno vrlo teško mogu reparirati. Na U4 je očito otkidanje pokrovnog tvrdog sloja dovelo do promjene i određenog oštećenja metala zavara, no, može se uočiti održavanje njegovog integriteta s mogućnošću relativno jednostavne reparacije. Valja napomenuti kako bi dodatni materijal za tvrdo navarivanje korišten u uzorcima U3 bio jednako, ako ne i bolji, ukoliko bi se primijenio na način na koji je primijenjen tvrdi materijal kod uzoraka U4, navarivanjem po površini zavara.

Ovaj pristup kombiniranju dodatnih materijala je relativno nov, a u zavarivačkom radu rijetko primjenjivan. Zbog svoje raznolikosti povoljnih kombinacija koje se mogu primijeniti nudi mnogo prostora za daljnji razvoj.

Zaustavljanje balističkog opterećenja posljedica je tvrdih slojeva koji su zavareni. Uslijed udara projektila o njih, zbog svoje krutosti oni raspoređuju opterećenje na veću površinu materijala iza sebe koji ga zbog svojih elastičnih svojstava apsorbira i tako rasprši preostalu energiju. Isto tako se njihovim pucanjem apsorbira dio energije.

Što se tiče ZUT-a, svi uzorci su pokazali nezadovoljavajuće rezultate balističkih ispitivanja. Rezultat tome je uništena mikrostruktura (postignuta termomehaničkom obradom u proizvodnom procesu) osnovnog materijala prilikom unosa topline zavarivanjem. Uslijed toga smanjen je povoljan omjer tvrdoće i žilavosti.

Rezultati vlačnog ispitivanja bili su relativno nezadovoljavajući, ali njihovom provedbom dobivena su saznanja o ponašanju takvih višekomponentnih zavarenih spojeva iz kojih se mogu zaključiti važne stvari za daljnja istraživanja. Iako čvrstoća nije glavni fokus ovih spojeva, ona je jedna od važnijih točaka razmatranja u razvoju višekomponentnih zavarenih spojeva.

Iz svega navedenog može se zaključiti kako je moguće poboljšati balističku otpornost zavara primjenom dodatnih materijala različite tvrdoće. Kako bi tehnologija bila primjenjiva potreban je dodatan razvoj kako bi se umanjili ili uklonili problemi ZUT-a i čvrstoće ovog zavarenog spoja. U poglavlju 11. je preporučeno idući korak razvoja.

LITERATURA

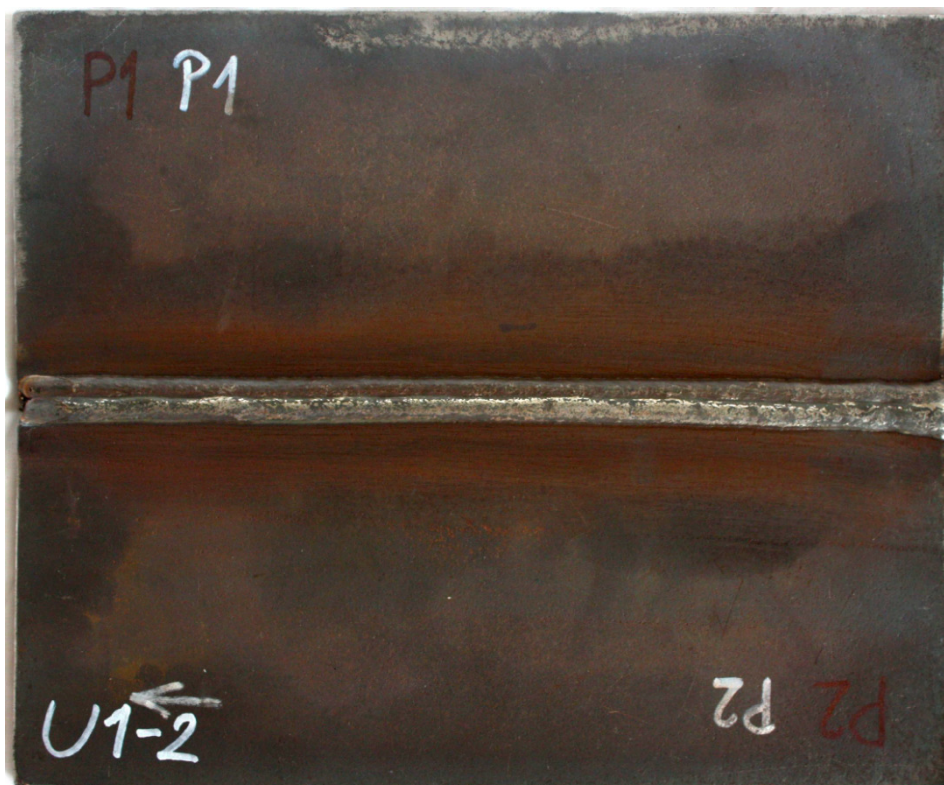
- [1] Roy C. Liabé: Ballistic materials and penetration mechanics, Elsevier, New York, 1980.
- [2] D. Showalter, W. Gooch, M. Burkins, J. Montgomery, and R. Squillacioti: Development and Ballistic Testing of a New Class of Auto-Tempered High-Hard Steels Under Military Specification MIL-DTL-46100E, Army Research Laboratory, Aberdeen Proving ground, 2009.
- [3] D. D. Showalter, W. A. Gooch, M. S. Burkins, R. S. Koch: Ballistic Testing of SSAB Ultra-High-Hardness Steel for Armor Applications, Army Research Laboratory, Aberdeen Proving ground, 2008.
- [4] www.ssab.com; 11.04.2015
- [5] I. Barényi, O. Híreš, P. Lipták: Changes in Mechanical Properties of Armoured UHSLA Steel ARMOX 500 After Over Tempering, University of Alexander Dubcek, University of Trencin, Faculty of Special Technology, Trencin, Slovak Republic, 2013.
- [6] M. Novosel, D. Krumes: Posebni čelici, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 1998.
- [7] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof: Svojstva i primjena materijala, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.
- [8] M. Maalekian: The Effects of Alloying Elements on Steels (I), Christian Doppler Laboratory for Early Stages of Precipitation, Institut für Werkstoffkunde, Schweißtechnik und Spanlose Formgebungsverfahren, Technische Universität, Graz, 2007.
- [9] www.atimetals.com; 23.04.2015.
- [10] www.esab.com; 25.04.2015.
- [11] www.wballoys.co.uk; 30.04.2015.
- [12] www.twi-global.com; 02.05.2015.
- [13] K. Weman, G. Lindén, MIG welding guide, Woodhead Publishing and Maney Publishing on behalf of The Institute of Materials, Minerals & Mining, Cambridge, 2006.
- [14] www.fronius.com; 03.05.2015.
- [15] www.kobelco-welding.jp; 05.05.2015.
- [16] R. Rauch, S. Kapl, G. Posch, K. Radlmayr, High Strength Low Alloy Steel Weldments with Accommodated Qualities to the Base Metal, Springer, 2012.

- [17] Z. Lukačević, Zavarivanje. Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavonskom BJoirodu, Slavonski Brod, 1998.
- [18] M. A. Meyers, Dynamic Behavior of Materials, University of California, San Diego, 1994.
- [19] J. A. Zukas, High-Velocity Impact Dynamics, Willey-Interscience, 1990.
- [20] W. Bruchey, Computational Aspects of Penetration Mechanics, Springer, 1983.
- [21] A. Tate, A simple estimate of the minimum target obliquity required for the ricochet of a high speed long rod projectile, Journal of Physics D: Applied Physics, Volume 12, Number 11, 1979.
- [22] www.lincolnelectric.com; 10.06.2015.
- [23] www.durmat.com; 10.06.2015.
- [24] www.castolin.com; 10.06.2015.

PRILOZI

- I. Fotodokumentacija balistički ispitanih uzoraka
- II. Tehnička dokumentacija
- III. CD

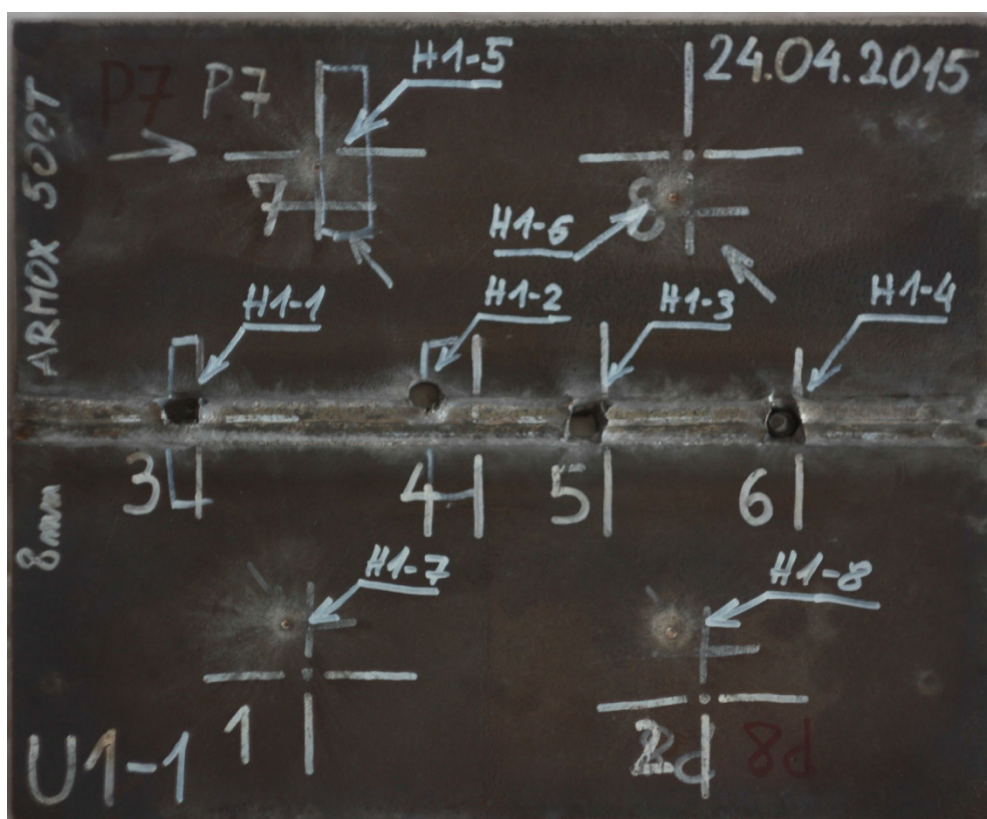
I. Fotodokumentacija balistički ispitanih uzoraka



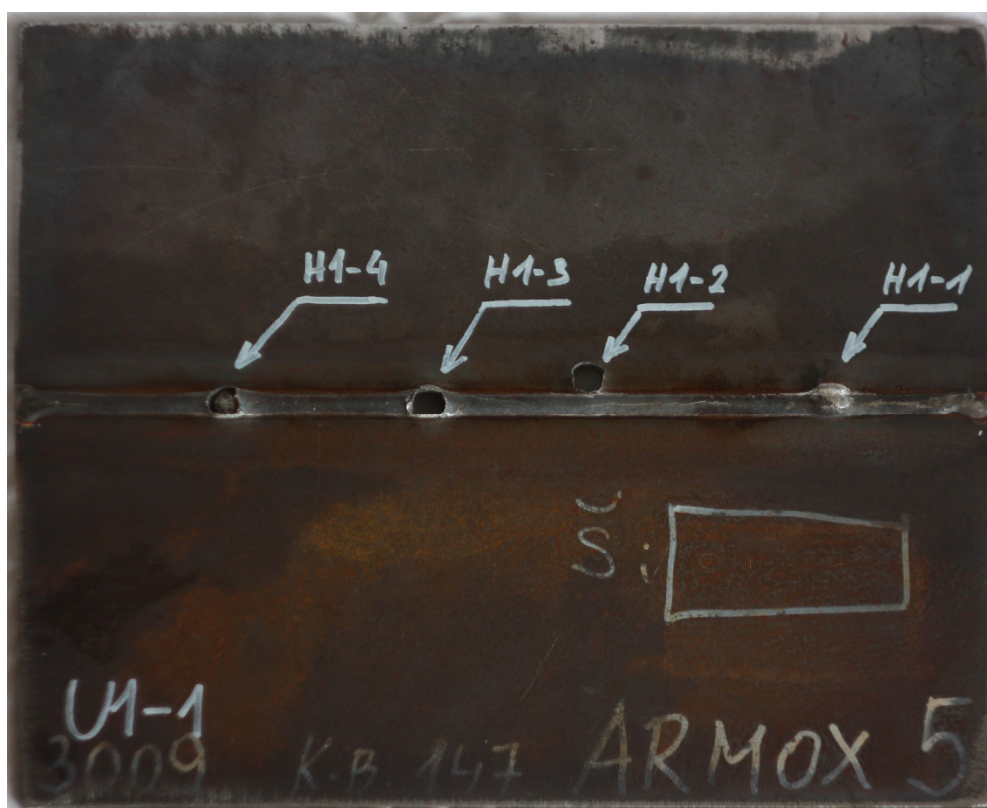
I.1. Uzorak U1-2, prednja strana



I.2. Uzorak U1-2, stražnja strana



I.3. Uzorak U1-1 nakon balističkog ispitivanja, prednja strana



I.4. Uzorak U1-1 nakon balističkog ispitivanja, stražnja strana



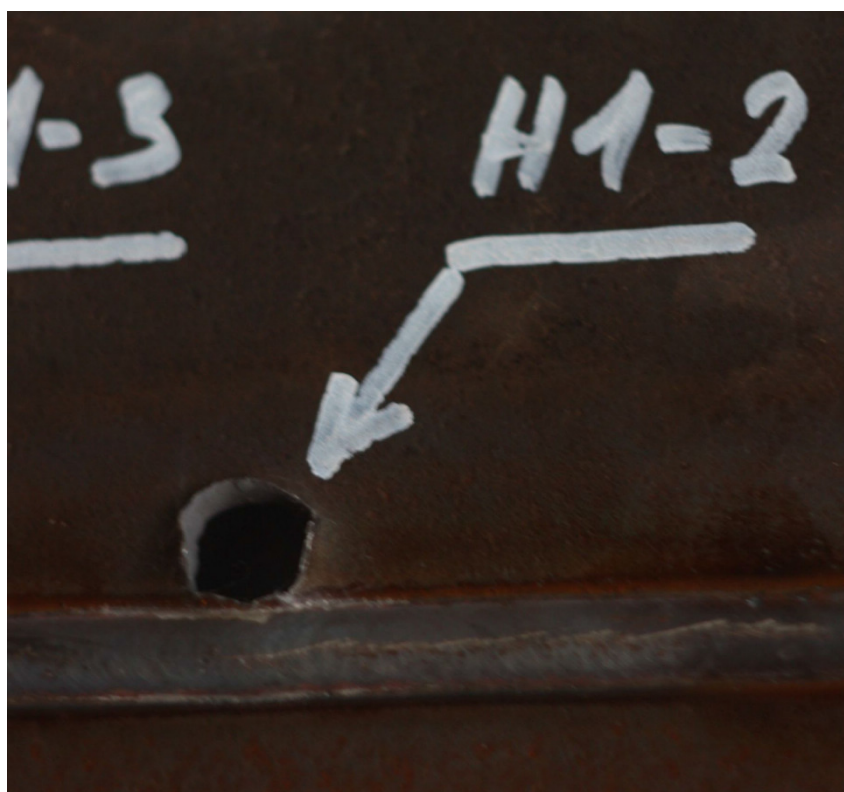
I.5. Pogodak H1-1, prednja strana



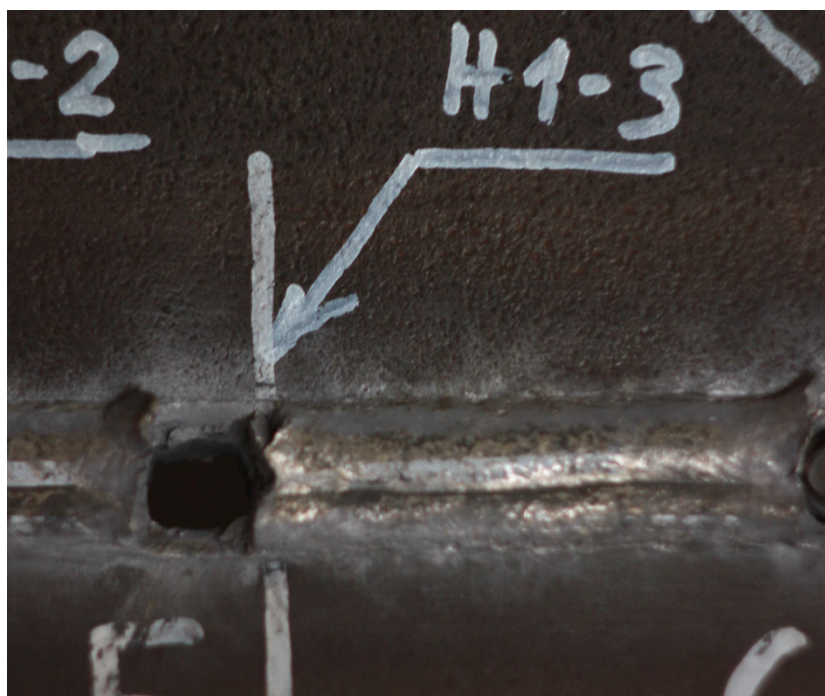
I.6. Pogodak H1-1, stražnja strana



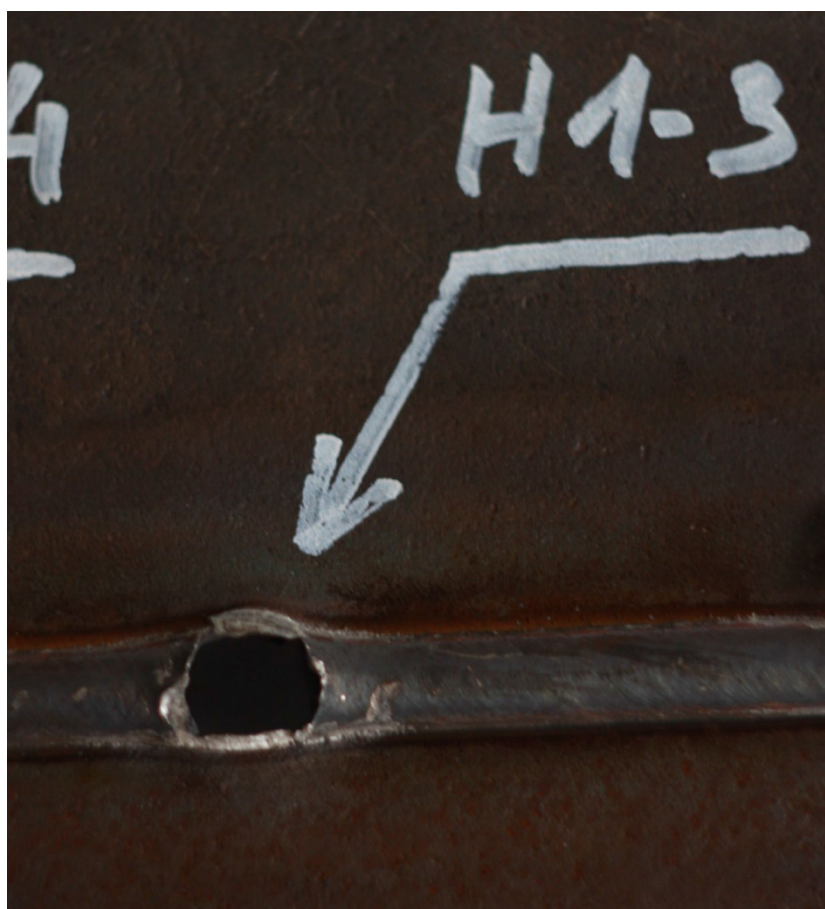
I.7. Pogodak H1-2, prednja strana



I.8. Pogodak H1-2, stražnja strana



I.9. Pogodak H1-3, prednja strana



I.10. Pogodak H1-3, stražnja strana



I.11. Pogodak H1-4, prednja strana



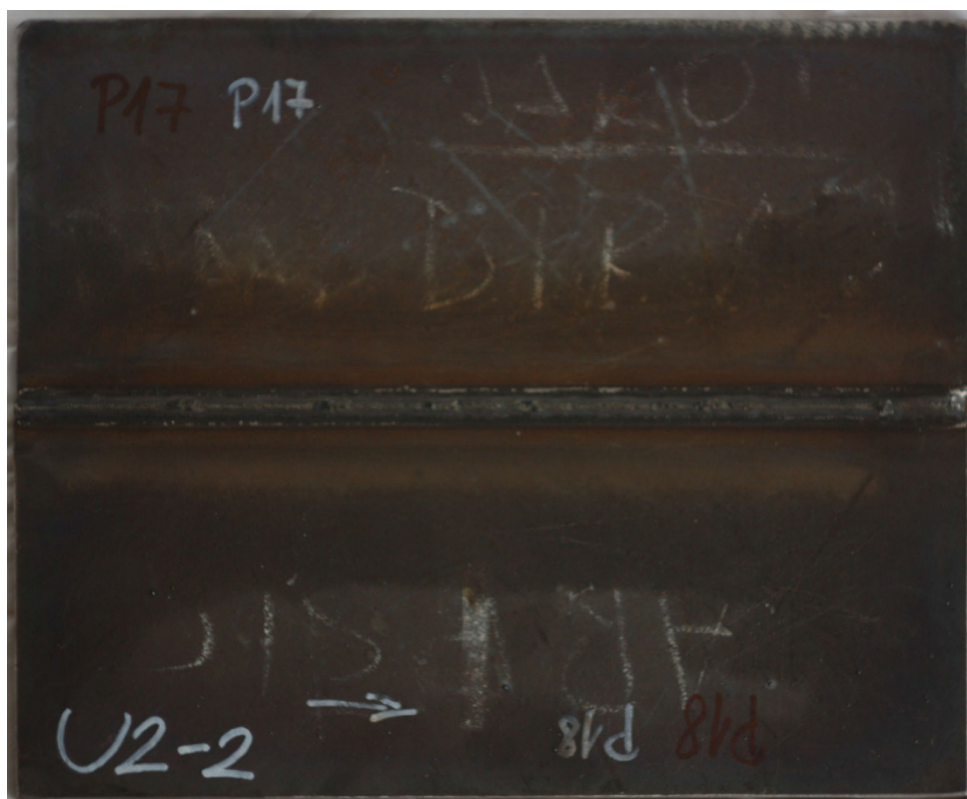
I.12. Pogodak H1-4, stražnja strana



I.13. Pogodak H1-5, prednja strana



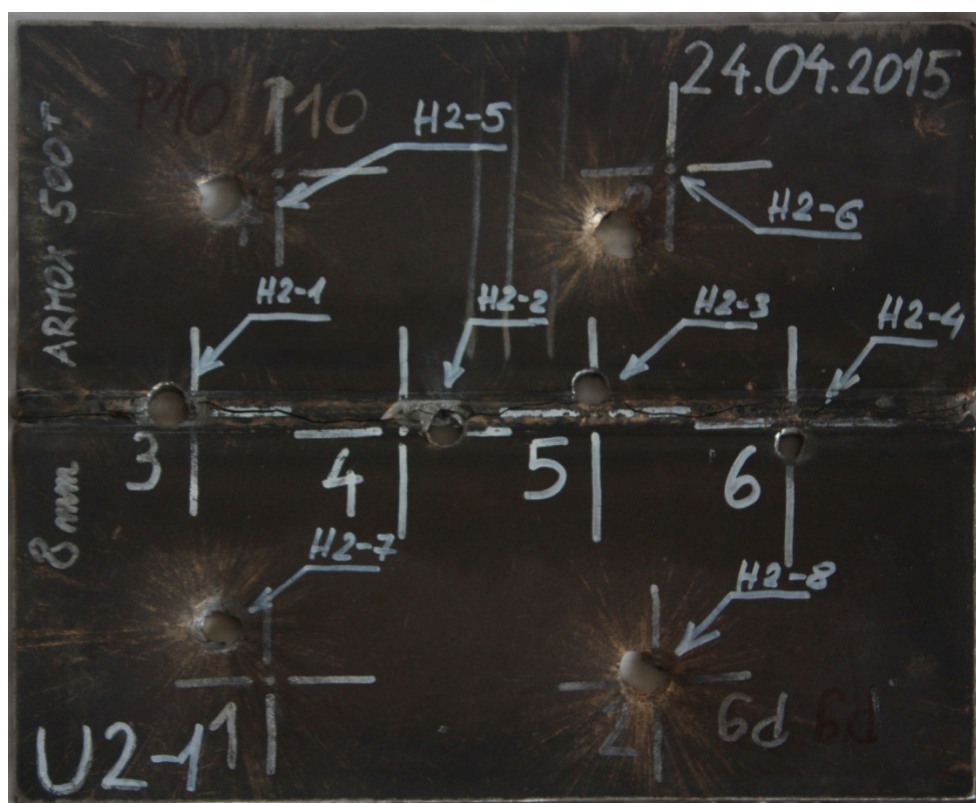
I.14. Pogodak H1-6, prednja strana



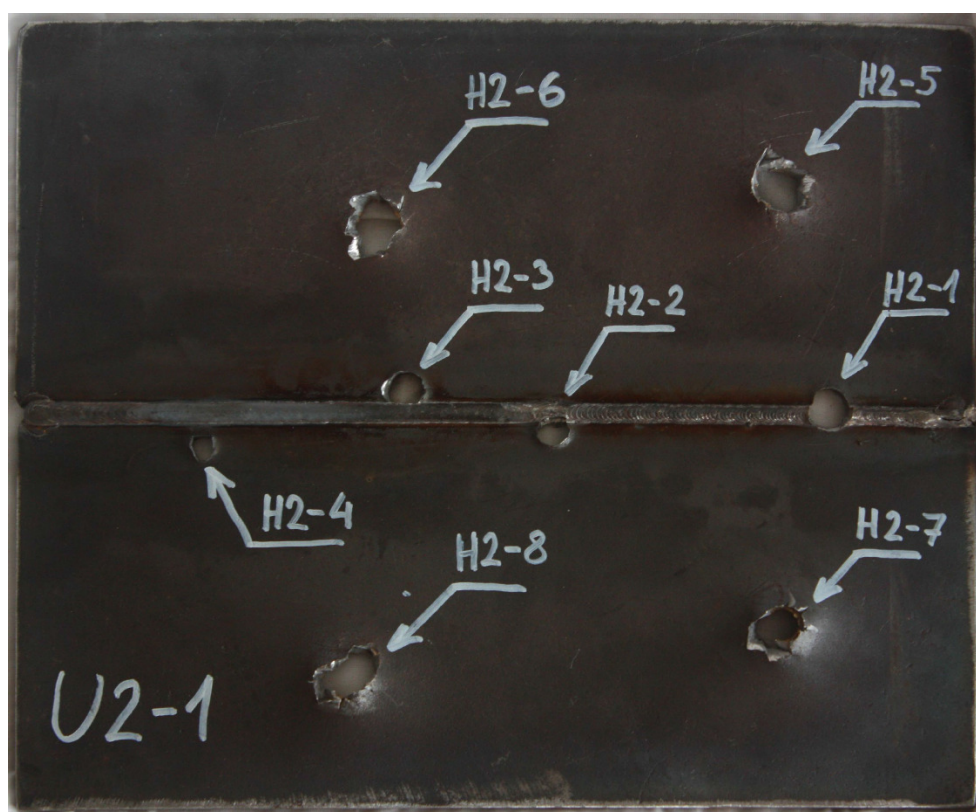
I.15. Uzorak U2-2, prednja strana



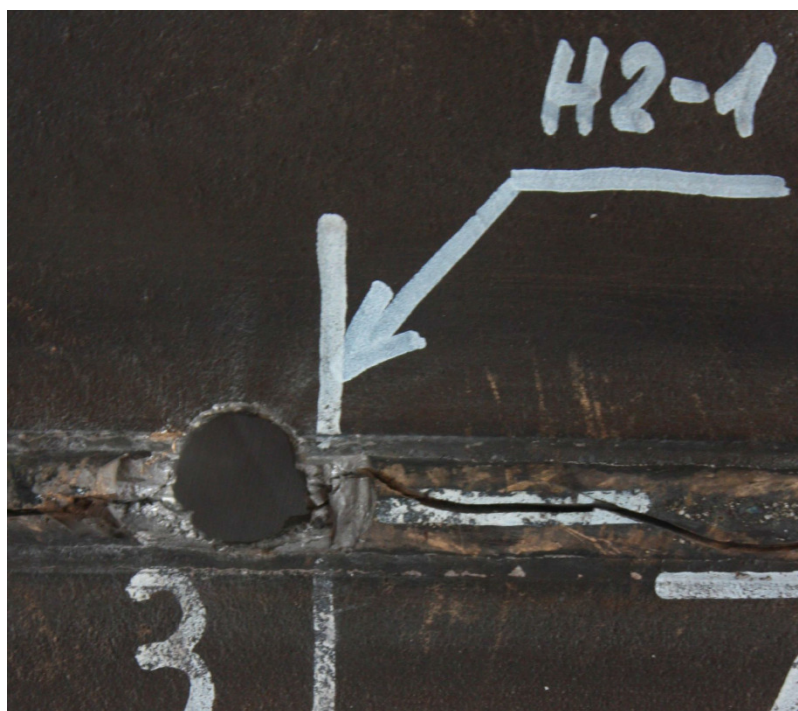
I.16. Uzorak U2-2, stražnja strana



I.17. Uzorak U2-1 nakon balističkog ispitivanja, prednja strana



I.18. Uzorak U2-1 nakon balističkog ispitivanja, stražnja strana



I.19. Pogodak H2-1, prednja strana



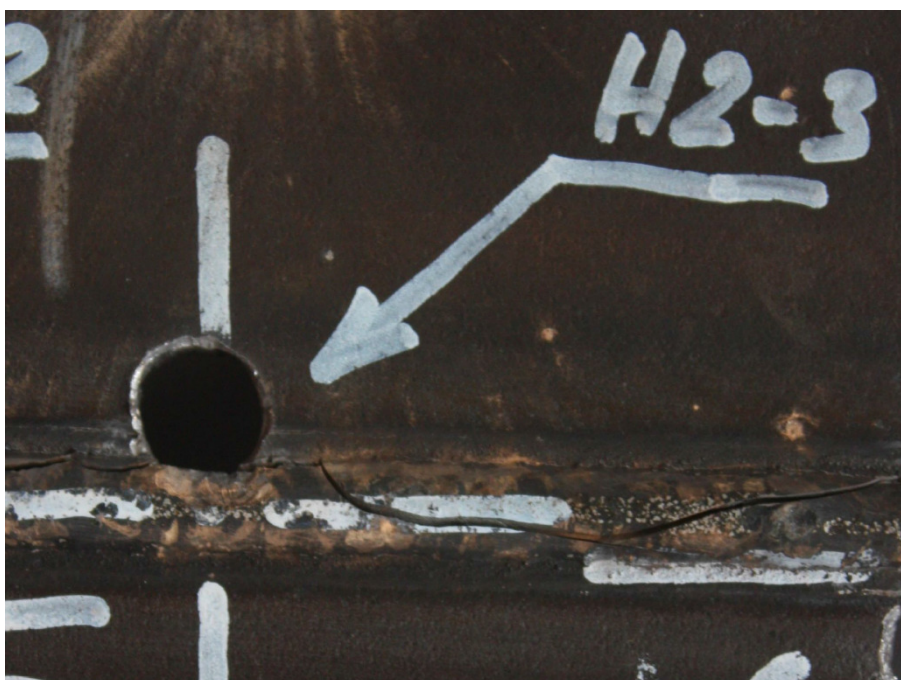
I.20. Pogodak H2-1, stražnja strana



I.21. Pogodak H2-2, prednja strana



I.22. Pogodak H2-2, stražnja strana



I.23. Pogodak H2-3, prednja strana



I.24. Pogodak H2-3, stražnja strana



I.25. Pogodak H2-4, prednja strana



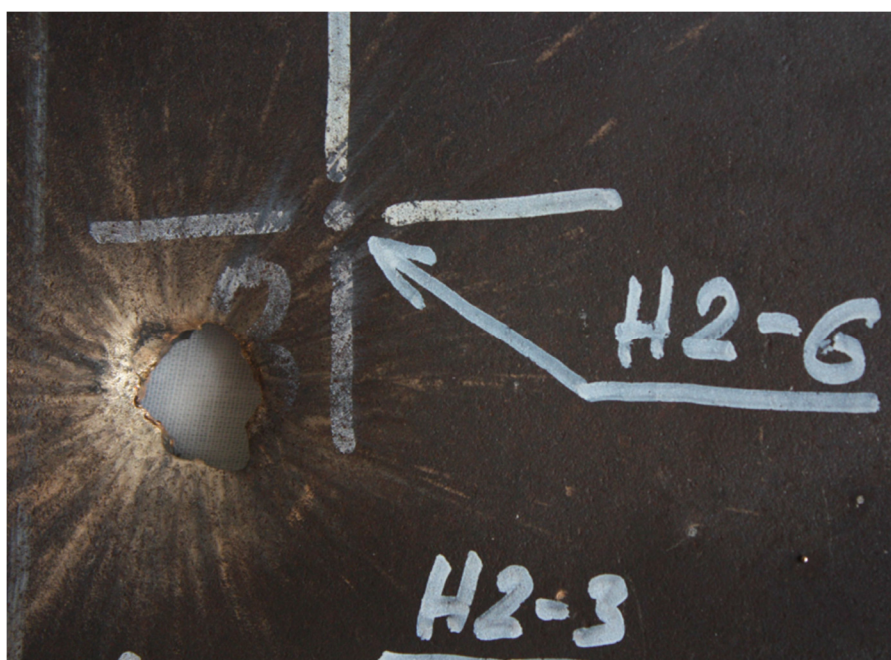
I.26. Pogodak H2-4, stražnja strana



I.27. Pogodak H2-5, prednja strana



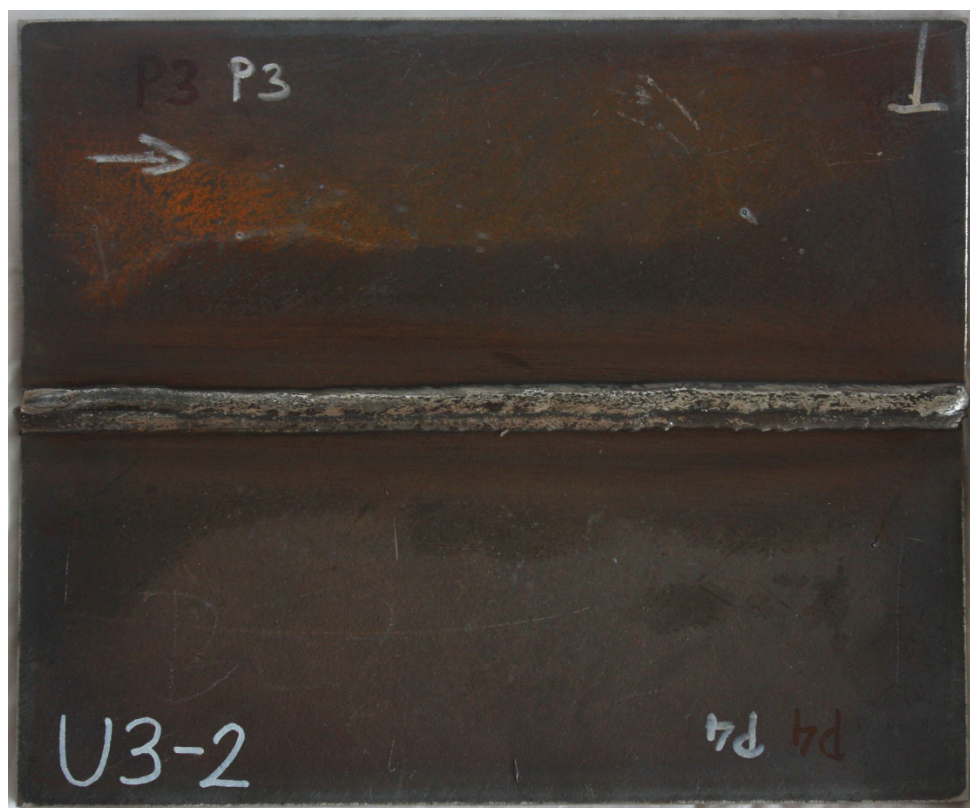
I.28. Pogodak H2-5, stražnja strana



I.29. Pogodak H2-6, prednja strana



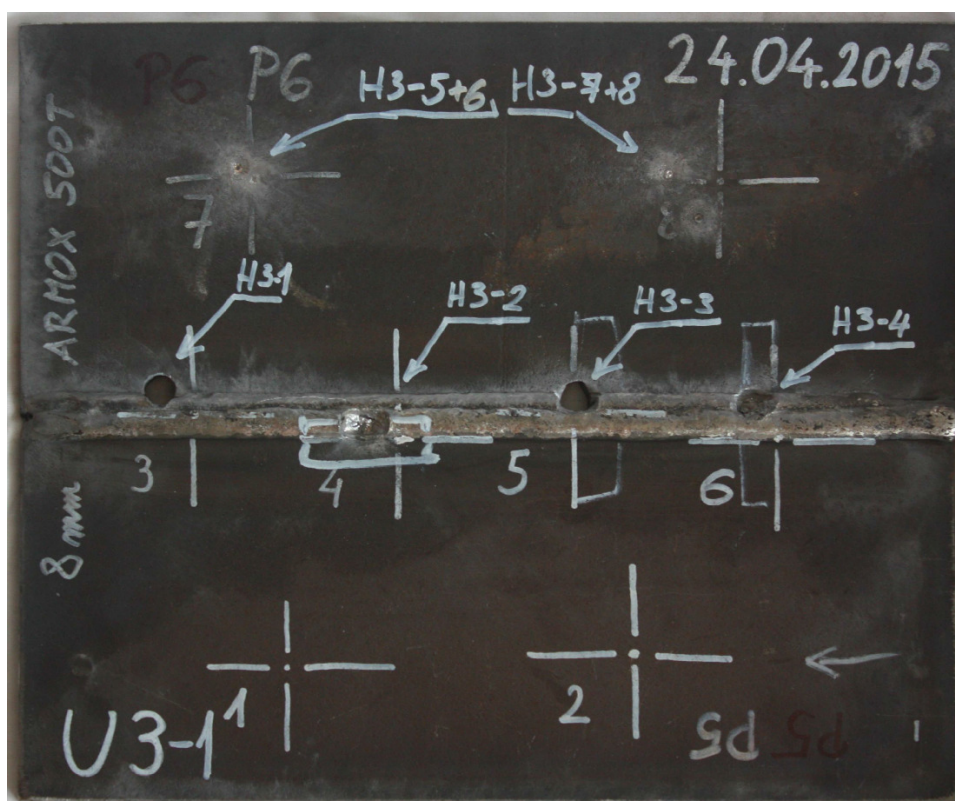
I.30. Pogodak H2-6, stražnja strana



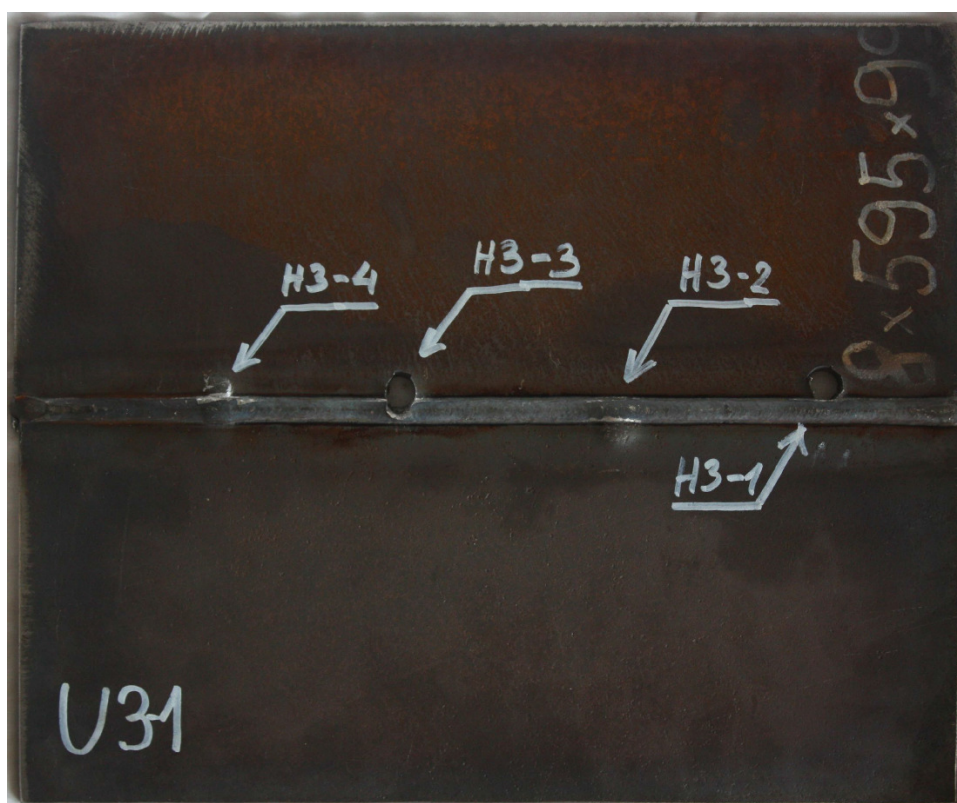
I.31. Uzorak U3-2, prednja strana



I.32. Uzorak U3-2, stražnja strana



I.33. Uzorak U3-1 nakon balističkog ispitivanja, prednja strana



I.34. Uzorak U3-1 nakon balističkog ispitivanja, stražnja strana



I.35. Pogodak H3-1, prednja strana



I.36. Pogodak H3-1, stražnja strana



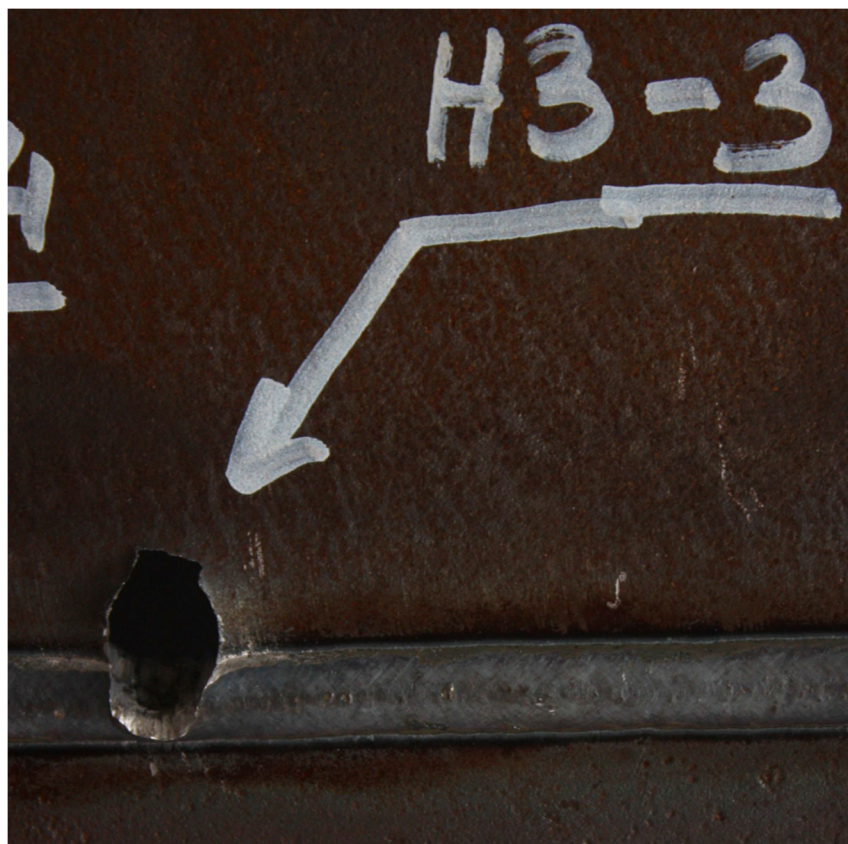
I.37. Pogodak H3-2, prednja strana



I.38. Pogodak H3-2, stražnja strana



I.39. Pogodak H3-3, prednja strana



I.40. Pogodak H3-3, stražnja strana



I.41. Pogodak H3-4, prednja strana



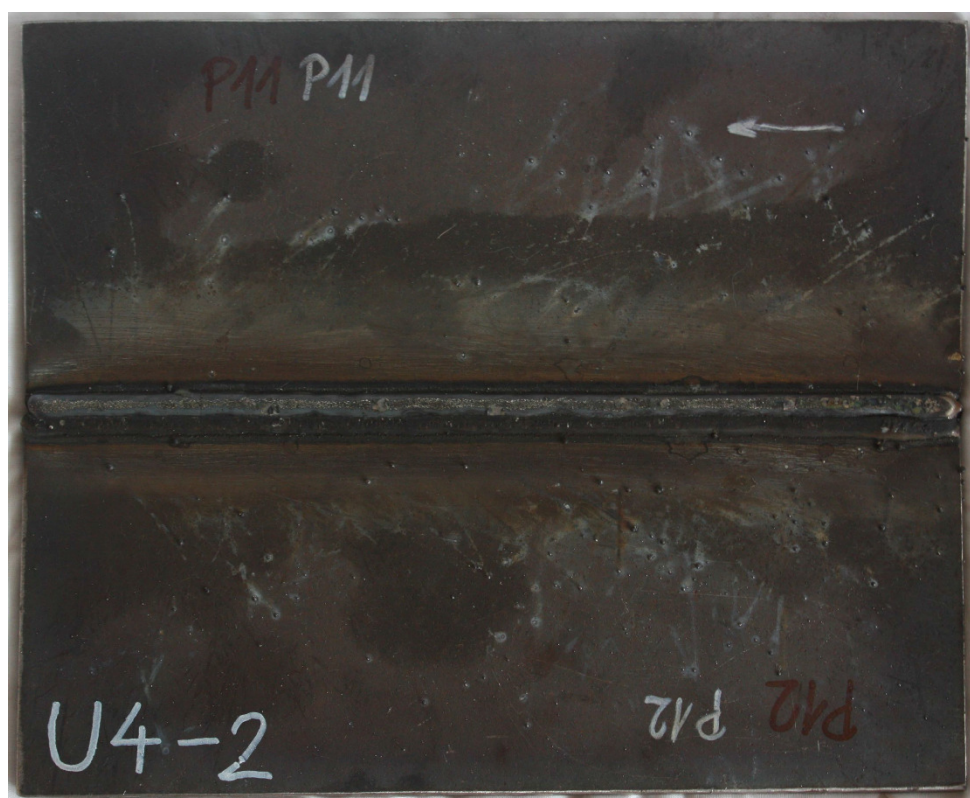
I.42. Pogodak H3-4, stražnja strana



I.43. Pogodci H3-5+6, prednja strana



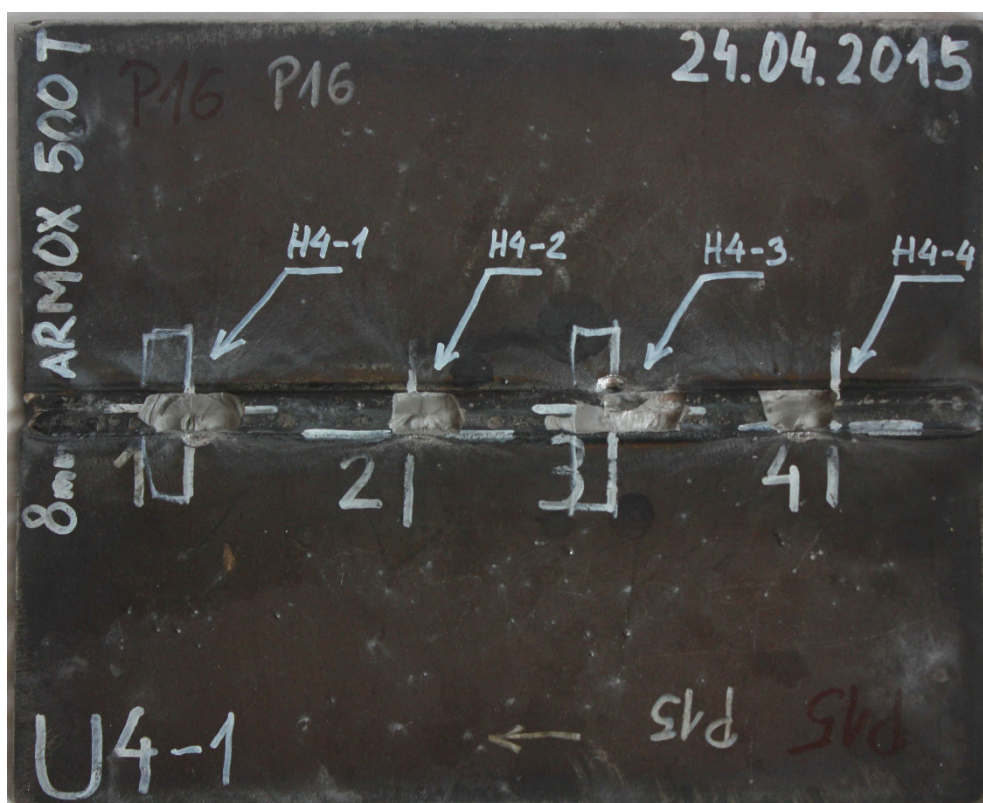
I.44. Pogodci H3-7+8, prednja strana



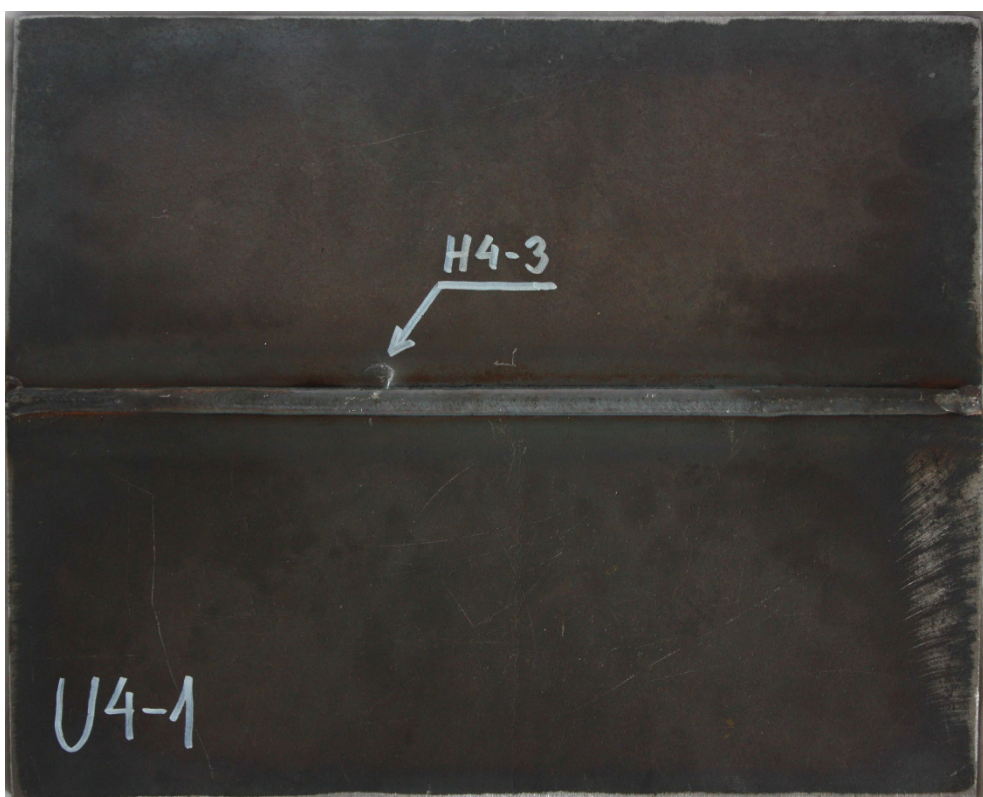
I.45. Uzorak U4-2, prednja strana



I.46. Uzorak U4-2, stražnja strana



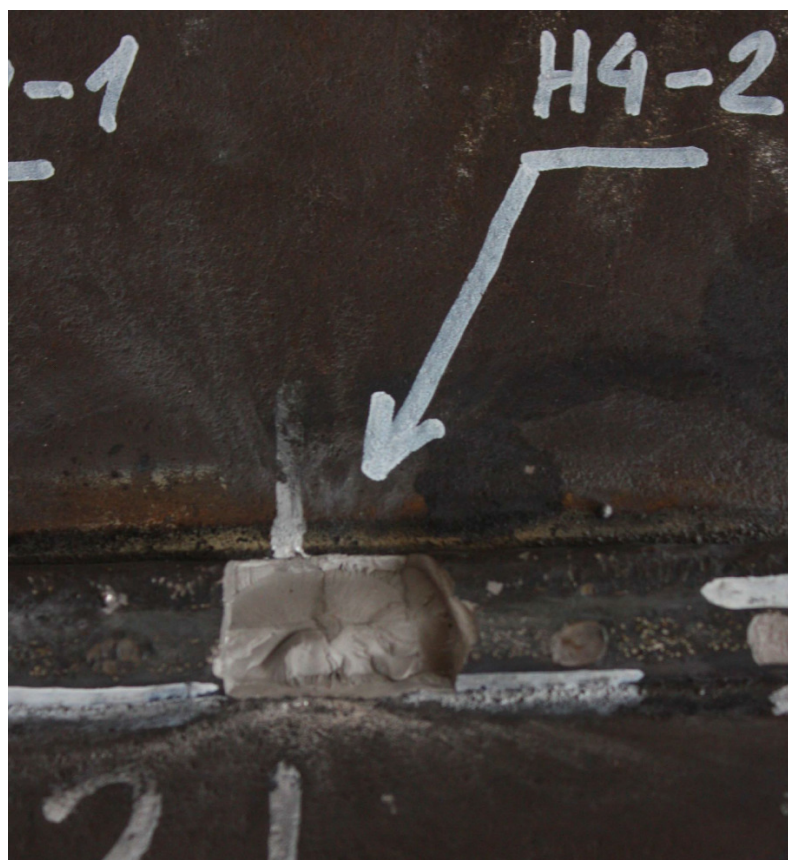
I.47. Uzorak U4-1 nakon balističkog ispitivanja, prednja strana



I.48. Uzorak U4-1 nakon balističkog ispitivanja, stražnja strana



I.49. Pogodak H4-1, prednja strana



I.50. Pogodak H4-2, prednja strana



I.51. Pogodak H4-3, prednja strana

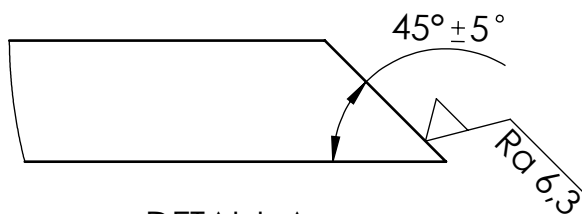
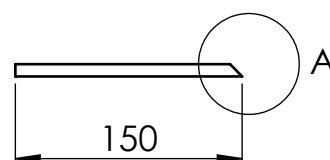
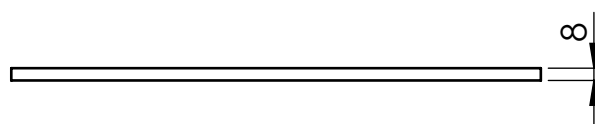
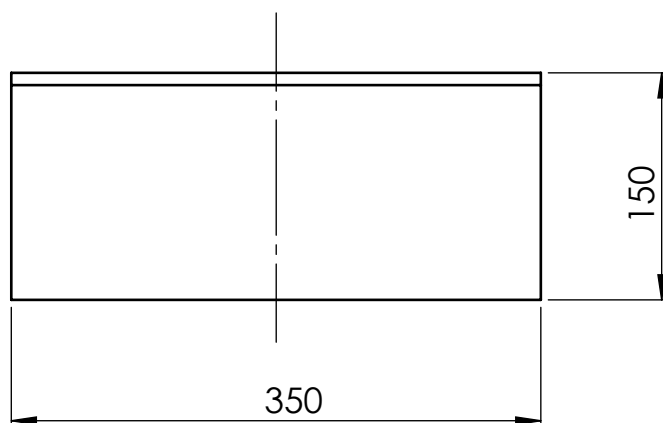


I.52. Pogodak H4-3, stražnja strana

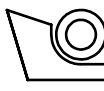
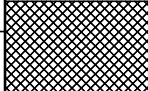
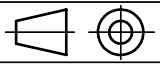


I.53. Pogodak H4-4, prednja strana

$\sqrt{Ra\ 6,3}$



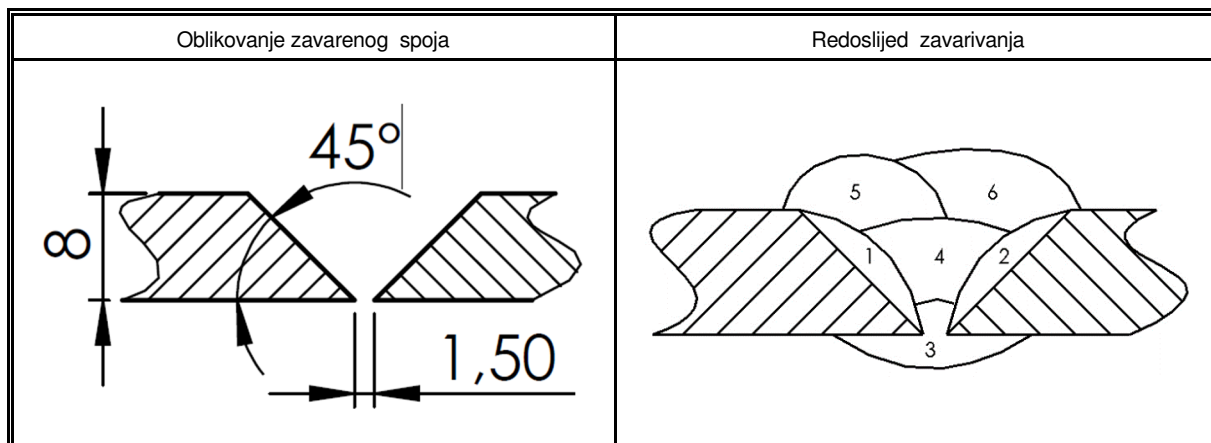
DETALJ A
MJERILO 2:1

Broj naziva - code	Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
	Razradio	22.02.2015.	Ante Barišić		
	Crtao	22.02.2015.	Ante Barišić		
	Pregledao				
ISO - tolerancije	Objekt:			Objekt broj:	
				R. N. broj:	
	Napomena: skošenje izraditi obradom odvajanja čestica				Kopija
	Materijal: Armox® 500T		Masa: 3,3 kg		
	 Naziv: Ploča sa skošenjem, priprema za zavareni spoj			Pozicija:	
	Mjerilo originala				
	1:5				
Crtež broj: 1					Format: A4 Listova: 1 List: 1

Specifikacija postupka zavarivanja U1

Mjesto: FSB, Sveučilište u Zagrebu
 Oznaka: U1
 Postupak zavarivanja: 131
 Vrsta spoja: sučeljeni
 Obrada rubova: strojno, odvajanjem čestica

Pripreme rubova i čišćenje: čistom žičanom četkom
 od nehrđajućeg čelika i alkoholom
 Debljina osnovnog materijala: 8 mm
 Položaj zavarivanja: PA



Sloj	Postupak zavarivanja	Promjer dodatnog materijala, mm	Jakost struje zavarivanja, A	Napon zavarivanja, V	Vrsta struje, polaritet	Brzina dodavanja žice, m/min	Brzina zavarivanja, cm/min	Unos topline, kJ
1	131	1,2	135-140	23,8-24	DC(+) pulse	4	31	0,83
2	131	1,2	135-140	23,8-24	DC(+) pulse	4	31	0,83
3	131	1,2	135-140	23,7-24	DC(+) pulse	4	25	1,03
4	131	1,2	135-140	23,8-24	DC(+) pulse	4	25	1,03
5	131	1,2	185-190	28,5-28,6	DC(+) pulse	6,4	35,5	1,19
6	131	1,2	185-190	28,5-28,6	DC(+) pulse	6,4	35,5	1,19

Osnovni materijal:

ARMOX® 500T

Dodatni materijal:

Lincoln Electric® MIG 309L Si

Temperatura predgrijavanja:

-

Međuslojna temperatura, °C:

<100

Toplinska obrada:

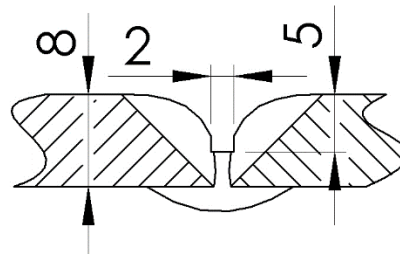
-

Dodatne informacije:

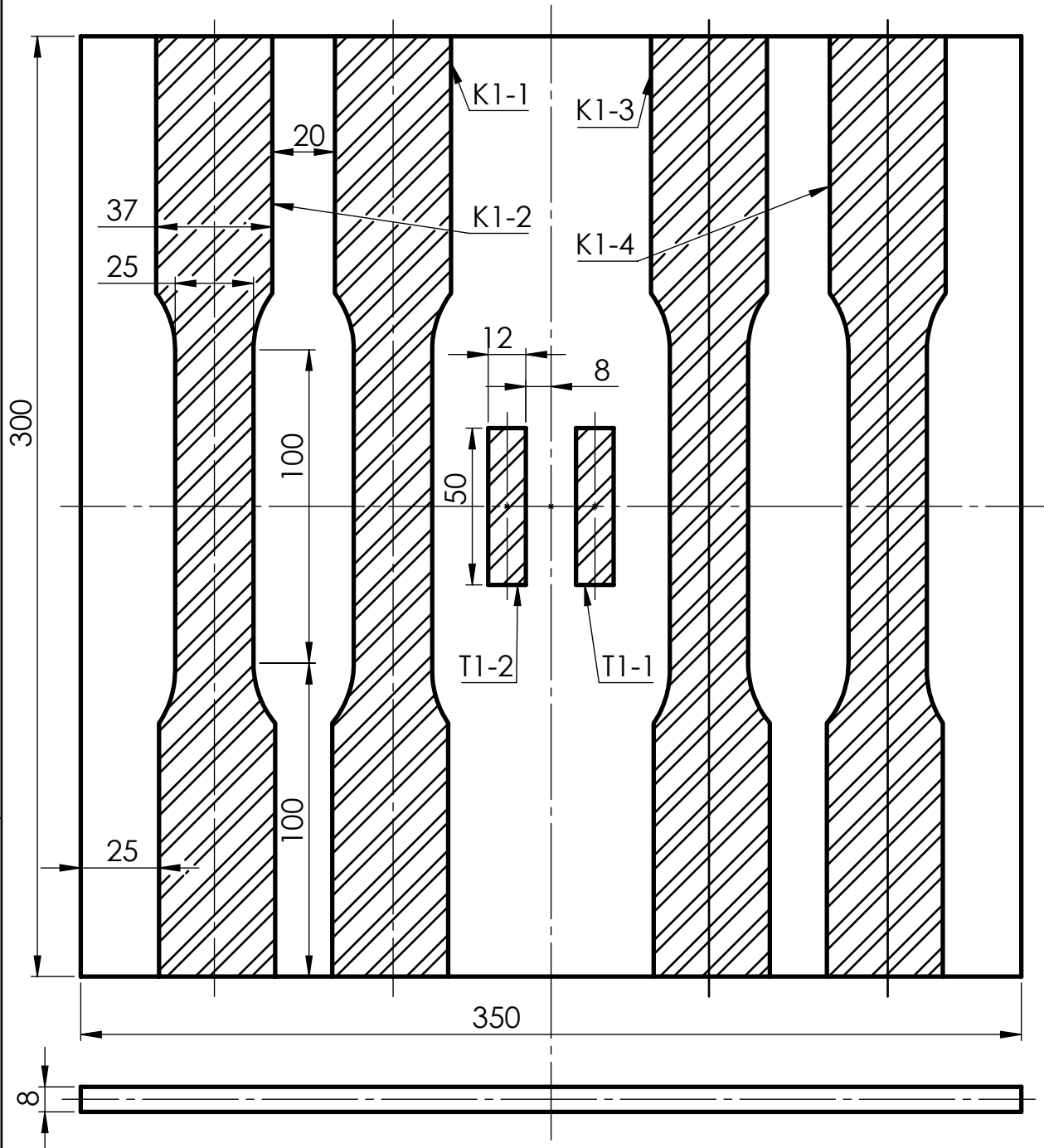
Prolazi 1 i 2 su međuslojni prolazi (eng. buttering layer), navariti ih u PA položaju prije spajanja dviju ploča korijenskim prolazom.

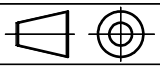
Korijenski prolaz izvesti sa korijenske strane u PA položaju.

Nakon korijenskog prolaza čistom brusnom pločom odstraniti nečistoće koja se skupila u žljebu zavora kako je prikazano na slici.



Prije svakog novog prolaza očistiti prethodni čistom žičanom četkom od nehrđajućeg čelika i odmastiti alkoholom.

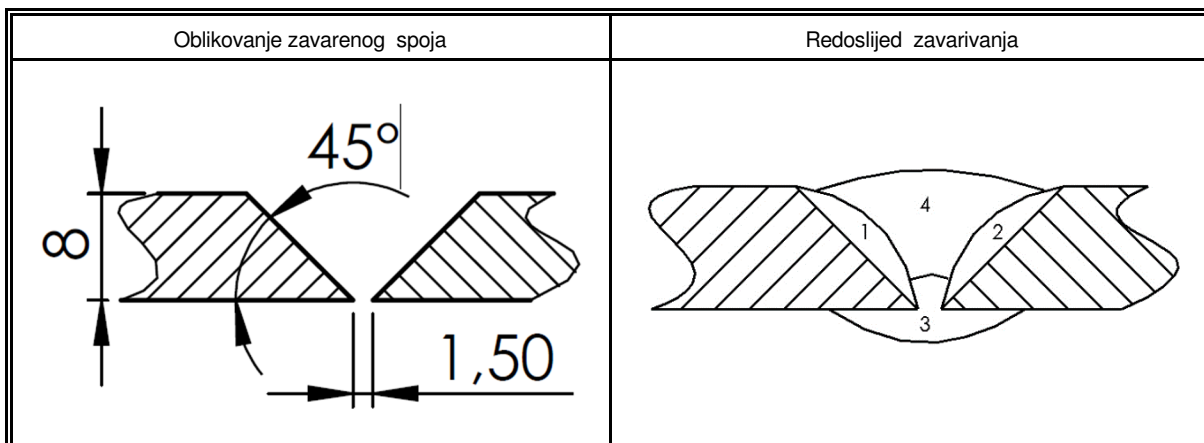


Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb	
Razradio		Ante Barišić			
Crtao		Ante Barišić			
Pregledao					
Objekt:			Objekt broj:		
			R. N. broj:		
Napomena: rezanje izvršiti vodenim mlazom			Kopija		
Materijal: ARMOX 500T			Masa: 6kg		
 Mjerilo originala		Naziv: U1-2, rezanje			Pozicija:
1:2		Crtež broj: 1			Format: A4
				Listova: 1	
				List: 1	

Specifikacija postupka zavarivanja U2

Mjesto: FSB, Sveučilište u Zagrebu
Oznaka: U2
Postupak zavarivanja: 131, 136
Vrsta spoja: sučeljeni
Obrada rubova: strojno, odvajanjem čestica

Pripreme rubova i čišćenje: čistom žičanom četkom
 od nehrđajućeg čelika i alkoholom
Debljina osnovnog materijala: 8 mm
Položaj zavarivanja: PA



Sloj	Postupak zavarivanja	Promjer dodatnog materijala, mm	Jakost struje zavarivanja, A	Napon zavarivanja, V	Vrsta struje, polaritet	Brzina dodavanja žice, m/min	Brzina zavarivanja, cm/min	Unos topline, kJ
1	131	1,2	135-140	23,8-24	DC(+) pulse	4	31	0,83
2	131	1,2	135-140	23,8-24	DC(+) pulse	4	31	0,83
3	131	1,2	135-140	23,7-24	DC(+) pulse	4	25	1,03
4	136	1,2	160-170	28,4-29	DC(+) pulse	7,3	35,5	1,15

Osnovni materijal:

ARMOX® 500T

Dodatni materijal:

Lincoln Electric® MIG 309L Si

Castolin Eutectic® EnDOtec® DO*30

Temperatura predgrijavanja:

-

Međuslojna temperatura, °C:

< 100

Toplinska obrada:

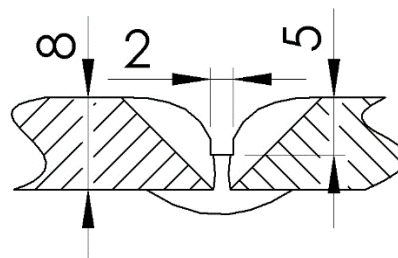
-

Dodatne informacije:

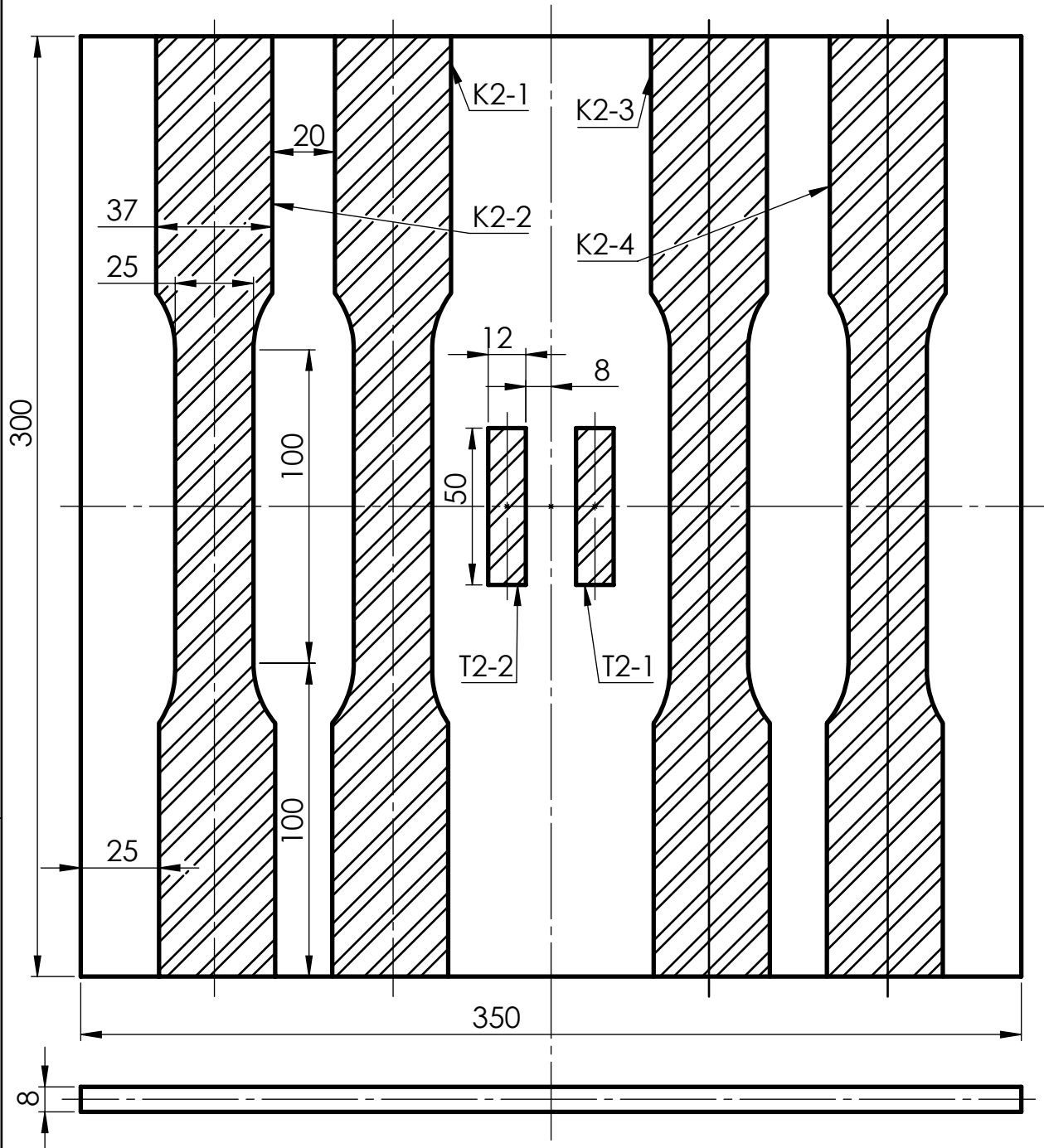
Prolazi 1 i 2 su međuslojni prolazi (eng. buttering layer), navariti ih u PA položaju prije spajanja dviju ploča korijenskim prolazom.

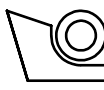
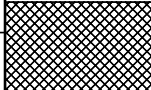
Korijenski prolaz izvesti sa korijenske strane u PA položaju.

Nakon korijenskog prolaza čistom brusnom pločom odstraniti nečistoće koja se skupila u žljebu zavara kako je prikazano na slici.



Prije svakog novog prolaza očistiti prethodni čistom žičanom četkom od nehrđajućeg čelika i odmastiti alkoholom.

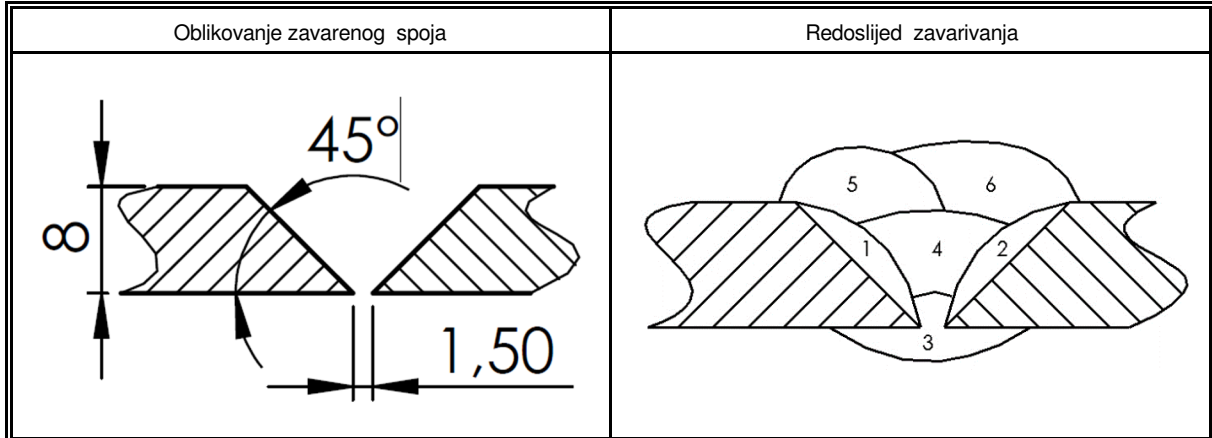


Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb	
Razradio		Ante Barišić			
Crtao		Ante Barišić			
Pregledao					
Objekt:			Objekt broj:		
			R. N. broj:		
Napomena: rezanje izvršiti vodenim mlazom			Kopija		
Materijal: ARMOX 500T			Masa: 6kg		
 Mjerilo originala		Naziv: U2-2, rezanje			Pozicija: Format: A4
1:2		Crtež broj: 1			Listova: 1
				List: 1	

Specifikacija postupka zavarivanja U3

Mjesto: FSB, Sveučilište u Zagrebu
Oznaka: U3
Postupak zavarivanja: 131, 114
Vrsta spoja: sučeljeni
Obrada rubova: strojno, odvajanjem čestica

Pripreme rubova i čišćenje: čistom žičanom četkom
 od nehrđajućeg čelika i alkoholom
Debljina osnovnog materijala: 8 mm
Položaj zavarivanja: PA



Sloj	Postupak zavarivanja	Promjer dodatnog materijala, mm	Jakost struje zavarivanja, A	Napon zavarivanja, V	Vrsta struje, polaritet	Brzina dodavanja žice, m/min	Brzina zavarivanja, cm/min	Unos topline, kJ
1	131	1,2	135-140	23,8-24	DC(+) pulse	4	31	0,83
2	131	1,2	135-140	23,8-24	DC(+) pulse	4	31	0,83
3	131	1,2	135-140	23,7-24	DC(+) pulse	4	25	1,03
4	114	1,2	208-212	21-21,3	DC(-)	9,1	44,5	0,78
5	131	1,2	160-170	28,4-29	DC(+) pulse	7,3	35,5	1,15
6	131	1,2	160-170	28,4-29	DC(+) pulse	7,3	35,5	1,15

Osnovni materijal:

ARMOX® 500T

Dodatni materijal:

Lincoln Electric® MIG 309L Si

Durmat® FD 739

Temperatura predgrijavanja:

-

Međuslojna temperatura, °C:

< 100

Toplinska obrada:

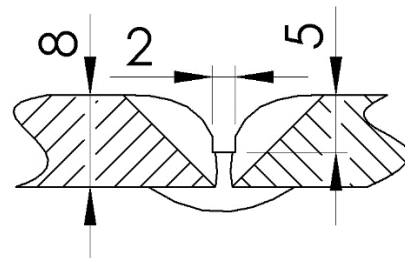
-

Dodatne informacije:

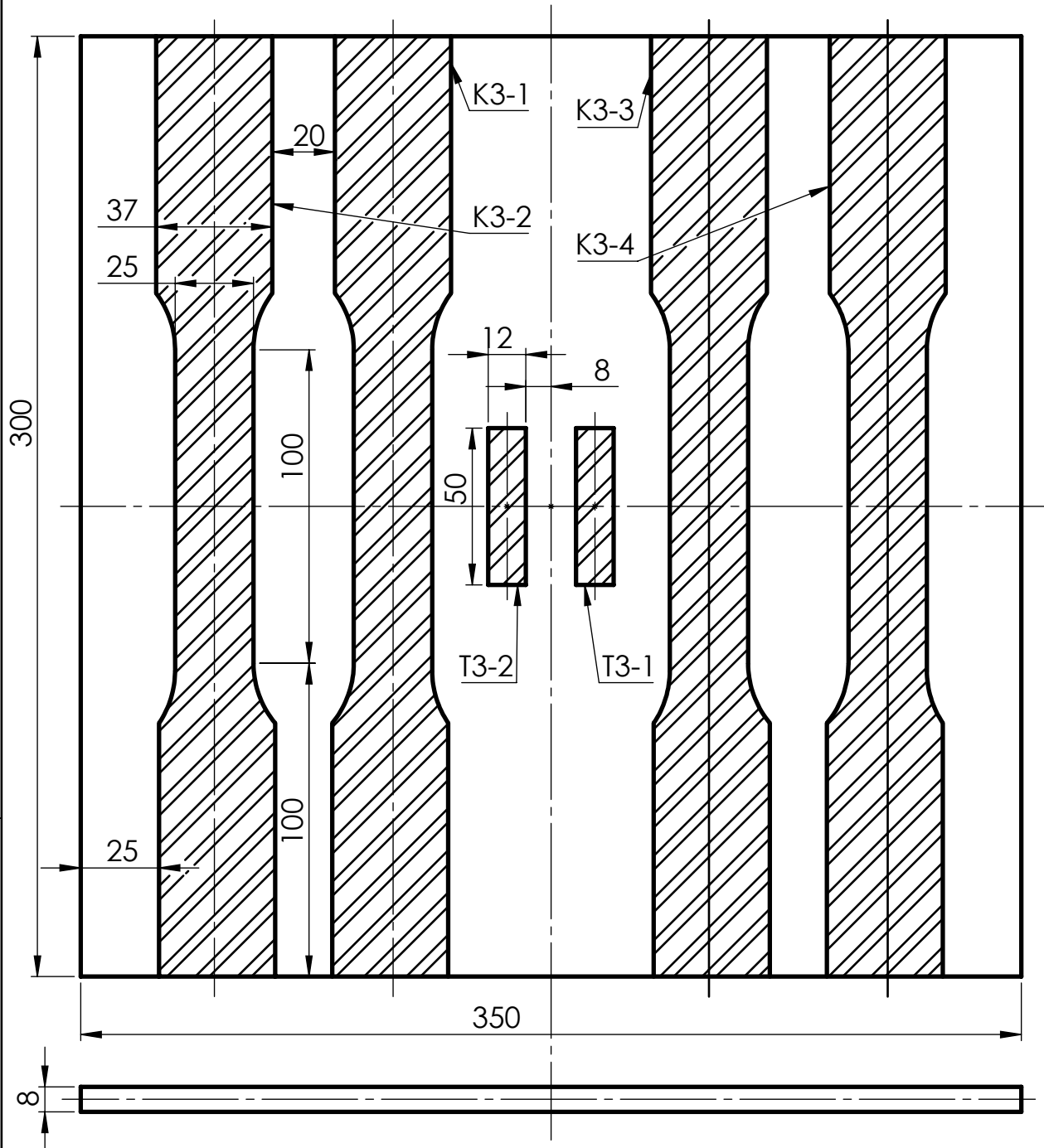
Prolazi 1 i 2 su međuslojni prolazi (eng. buttering layer), navariti ih u PA položaju prije spajanja dviju ploča korijenskim prolazom.

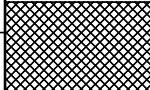
Korijenski prolaz izvesti sa korijenske strane u PA položaju.

Nakon korijenskog prolaza čistom brusnom pločom odstraniti nečistoće koja se skupila u žljebu zavora kako je prikazano na slici.



Prije svakog novog prolaza očistiti prethodni čistom žičanom četkom od nehrđajućeg čelika i odmastiti alkoholom.

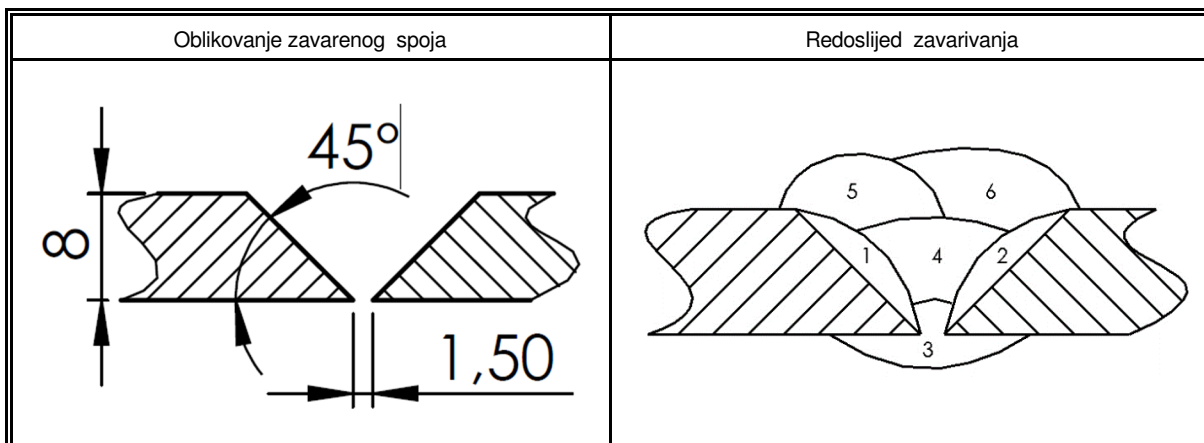


Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb	
Razradio		Ante Barišić			
Crtao		Ante Barišić			
Pregledao					
Objekt:			Objekt broj:		
			R. N. broj:		
Napomena: rezanje izvršiti vodenim mlazom			Kopija		
Materijal: ARMOX 500T			Masa: 6kg		
 Mjerilo originala		Naziv: U3-2, rezanje			Pozicija: Format: A4
1:2		Crtež broj: 1			Listova: 1
				List: 1	

Specifikacija postupka zavarivanja U4

Mjesto: FSB, Sveučilište u Zagrebu
Oznaka: U4
Postupak zavarivanja: 131, 136
Vrsta spoja: sučeljeni
Obrada rubova: strojno, odvajanjem čestica

Pripreme rubova i čišćenje: čistom žičanom četkom
 od nehrđajućeg čelika i alkoholom
Debljina osnovnog materijala: 8 mm
Položaj zavarivanja: PA



Sloj	Postupak zavarivanja	Promjer dodatnog materijala, mm	Jakost struje zavarivanja, A	Napon zavarivanja, V	Vrsta struje, polaritet	Brzina dodavanja žice, m/min	Brzina zavarivanja, cm/min	Unos topline, kJ
1	131	1,2	135-140	23,8-24	DC(+) pulse	4	31	0,83
2	131	1,2	135-140	23,8-24	DC(+) pulse	4	31	0,83
3	131	1,2	135-140	23,7-24	DC(+) pulse	4	25	1,03
4	131	1,2	135-140	23,8-24	DC(+) pulse	4	25	1,03
5	136	1,2	160-170	28,4-29	DC(+) pulse	7,3	35,5	1,15
6	136	1,2	160-170	28,4-29	DC(+) pulse	7,3	35,5	1,15

Osnovni materijal:

ARMOX® 500T

Dodatni materijal:

Lincoln Electric® MIG 309L Si
 Castolin Eutectic® EnDOtec® DO*30

Temperatura predgrijavanja:

-

Međuslojna temperatura, °C:

< 100

Toplinska obrada:

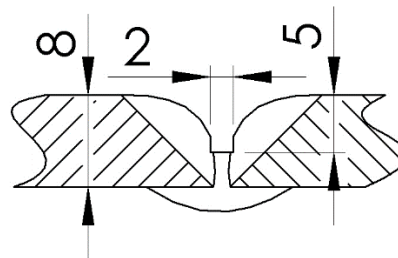
-

Dodatne informacije:

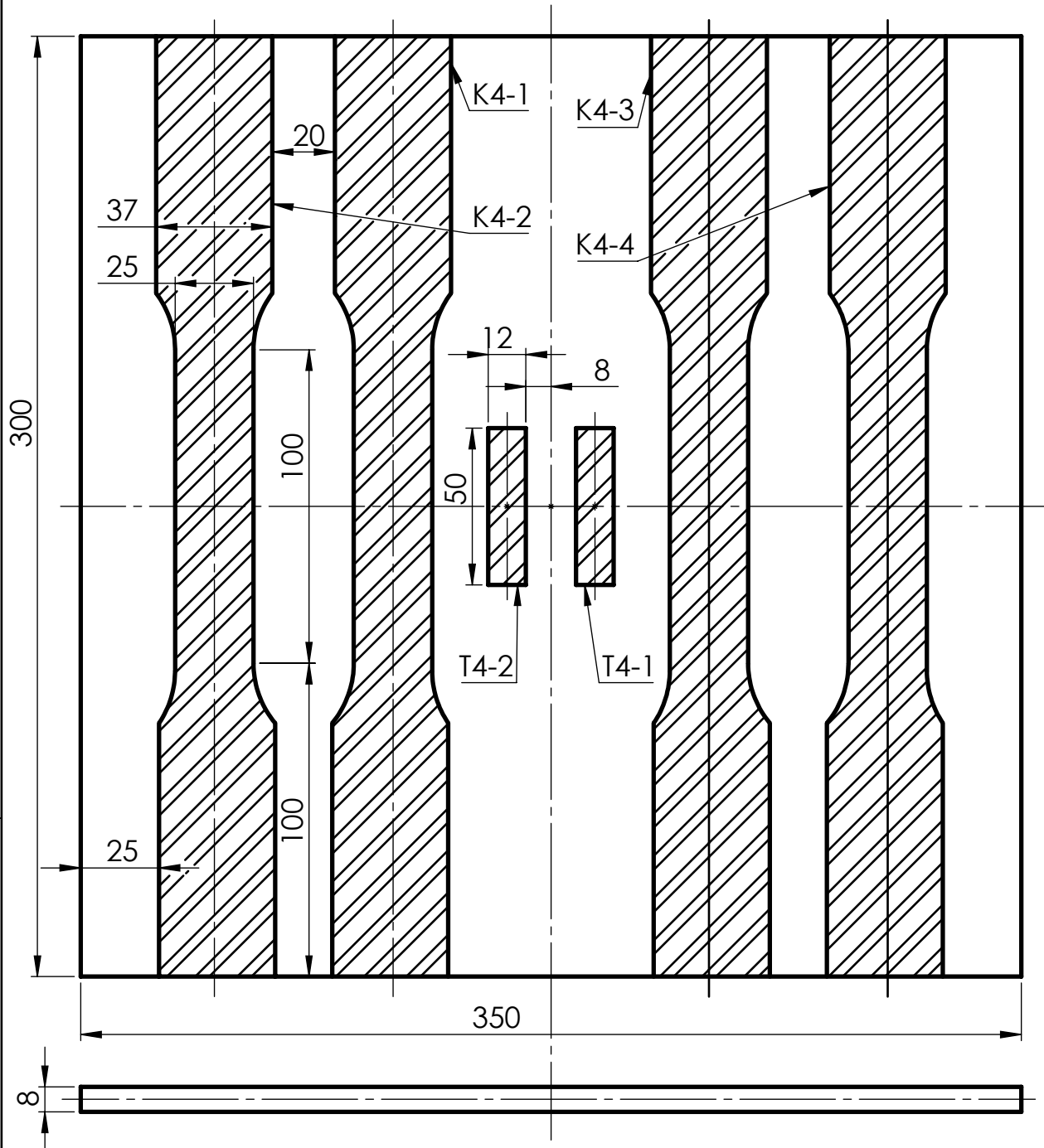
Prolazi 1 i 2 su međuslojni prolazi (eng. buttering layer), navariti ih u PA položaju prije spajanja dviju ploča korijenskim prolazom.

Korijenski prolaz izvesti sa korijenske strane u PA položaju.

Nakon korijenskog prolaza čistom brusnom pločom odstraniti nečistoće koja se skupila u žljebu zavora kako je prikazano na slici.



Prije svakog novog prolaza očistiti prethodni čistom žičanom četkom od nehrđajućeg čelika i odmastiti alkoholom.



Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb	
Razradio		Ante Barišić			
Crtao		Ante Barišić			
Pregledao					
Objekt:			Objekt broj:		
			R. N. broj:		
Napomena: rezanje izvršiti vodenim mlazom			Kopija		
Materijal: ARMOX 500T			Masa: 6kg		
 Mjerilo originala		Naziv: U4-2, rezanje			Pozicija: Format: A4
1:2		Crtež broj: 1			Listova: 1
				List: 1	